

FACULTE DE MEDECINE D'ALGER

MODULE DE CARDIOLOGIE

**DOCUMENT OFFICIEL DE REFERENCE
DU MODULE DE CARDIOLOGIE**

**Distribué et mis sur site web des étudiants
en médecine « la faculté » en janvier 2018**

**Ce document pédagogique est destiné aux étudiants
de graduation de cardiologie.**

L'ELECTROCARDIOGRAMME NORMAL

Auteur : Djamaleddine NIBOUCHÉ

Fonction de l'auteur : Professeur à la faculté de médecine d'Alger.

Année de réalisation du document : 2018

Objectifs pédagogiques

1^{er} objectif :

Connaître les bases de la sémiologie électrophysiologique.

2^{ème} objectif :

Connaître la notion de vecteur cardiaque.

3^{ème} objectif :

Connaitre la définition de l'électrocardiogramme.

4^{ème} objectif :

Connaître l'agencement des électrodes pour former les dérivations selon le plan frontal et horizontal.

5^{ème} objectif :

Connaître la définition de toutes les dérivations.

6^{ème} objectif :

Connaître la définition des dérivations.

7^{ème} objectif :

Savoir réaliser un tracé électrocardiographique.

8^{ème} objectif :

Connaître l'aspect normal de toutes les déflexions (morphologie, amplitude, durée, axe).

9^{ème} objectif :

Connaître le tracé normal de l'électrocardiogramme.

10^{ème} objectif :

Connaître le plan d'interprétation d'un électrocardiogramme normal.

Plan du cours

1. Définition.
2. Rappel de la sémiologie électrophysiologique.
3. Bases physiques de l'électrocardiographie.
4. Réalisation de l'électrocardiogramme.
5. Les dérivations.
6. Les déflexions, le tracé.
7. Enregistrement des dérivations précordiales.
8. La mesure de la fréquence cardiaque
9. L'axe électrique moyen du cœur.

10. Calcul de l'axe de dépolarisation ventriculaire ou axe de QRS.
11. Les indices.
12. L'électrocardiogramme normal de l'enfant.
13. L'électrocardiogramme normal du sujet âgé.
14. Interprétation de l'électrocardiogramme.
15. Bibliographie.

1. DEFINITION :

L'électrocardiogramme de surface est un tracé scalaire en fonction du temps de la dépolarisation et de la repolarisation des cellules myocardiques transmises à la surface du corps et recueillies par des électrodes placées selon un ordre universel. C'est un examen systématique en cardiologie.

2. RAPPEL DE LA SEMIOLOGIE ELECTROPHYSIOLOGIQUE :

2-1 **Electrophysiologie cellulaire**

Le muscle myocardique comporte des cellules qui initient et propagent l'excitation : les cellules nodales et les cellules qui répondent à l'excitation par une contraction : les cardiomyocytes.

L'activité électrique cardiaque cellulaire est à l'origine de la contraction myocardique. On parle de couplage excitation-contraction (couplage E-C).

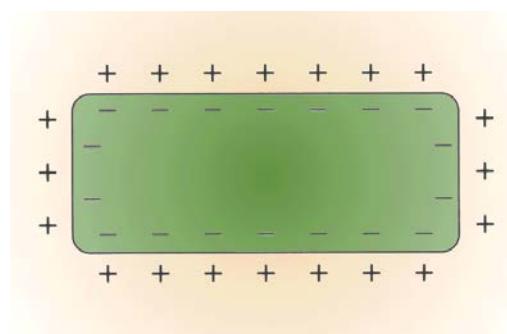
L'activité électrique des cellules cardiaques à l'échelle cellulaire est connue grâce à la technique des microélectrodes.

Comme la cellule nerveuse, la cellule cardiaque est polarisée au repos : si on place 2 microélectrodes l'une à la surface et l'autre à l'intérieur d'une fibre cardiaque, on enregistre une différence de potentiel transmembranaire (ddp) (Fig.1).

2-1-1 Activation et repolarisation cellulaire :

Comme la cellule nerveuse, la cellule cardiaque est polarisée au repos si on place 2 microélectrodes l'une à la surface et l'autre à l'intérieur d'une fibre cardiaque, on enregistre une différence de potentiel transmembranaire (ddp).

Au repos, c'est-à-dire à l'état basal, une fibre myocardique est dite "polarisée" lorsque la face interne de la membrane cellulaire est tapissée de charges électriques négatives et la face externe de charges électriques positives, de sorte qu'une microélectrode transperçant cette membrane recueille un potentiel négatif de l'ordre de -90 mV.



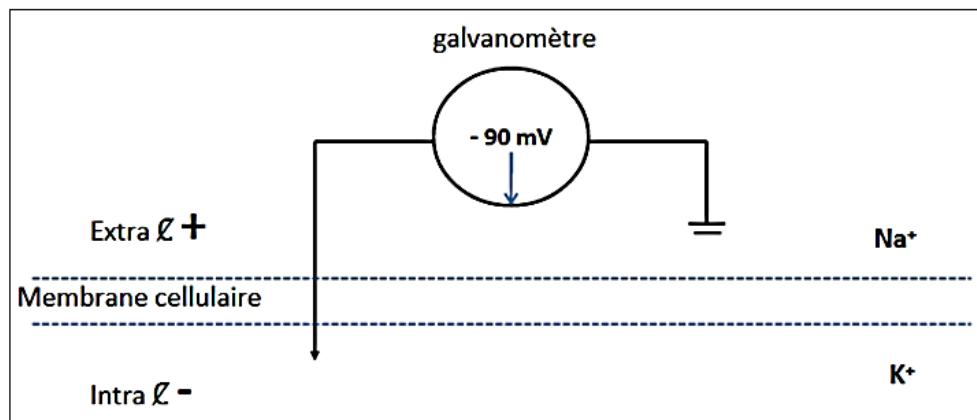


Fig.1 : Polarisation d'une cellule cardiaque au repos.

Lorsque cette fibre myocardique est stimulée, des mouvements ioniques se produisent de part et d'autre de la membrane cellulaire (Fig.2). Les charges négatives internes sont remplacées par des charges positives : le potentiel intracellulaire passe brusquement de -90mV à +20 mV, la cellule est dite "dépolarisée" et notre microélectrode enregistre cette montée rapide du voltage.

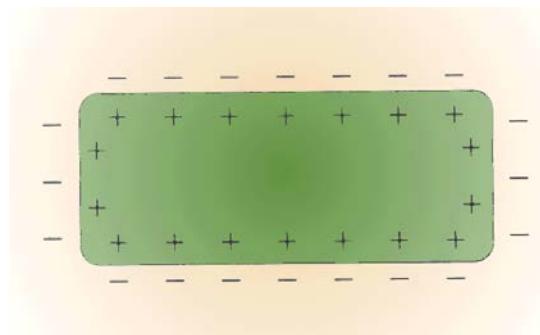
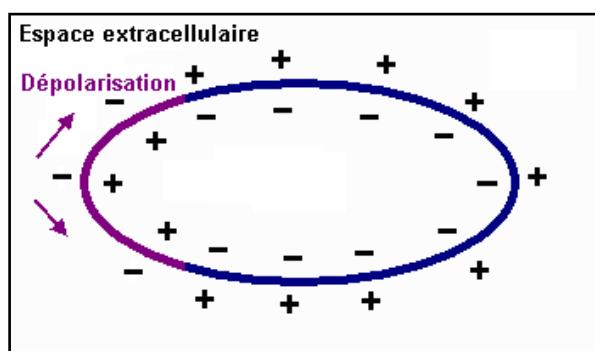


Fig.2 : Dépolarisation d'une cellule cardiaque

Ensuite des mouvements ioniques en sens inverse vont progressivement restaurer l'état de départ : c'est le processus de "repolarisation" qui va ramener le potentiel intracellulaire à sa valeur initiale.

2-1-2 Les flux ioniques : le potentiel d'action (1) (Fig.3) :

Au repos, les différences de concentration des ions trans-membranaires tendent à entraîner des mouvements passifs qui s'effectuent dans le sens des gradients, c'est à dire un flux entrant dans la cellule de Na^+ et Ca^{++} (à plus forte concentration extra-cellulaire) et un courant sortant vers le milieu extra-cellulaire de K^+ (concentration intra-cellulaire plus élevée). Ce niveau de potentiel de repos se situe aux alentours de -90mV pour les cellules myocardiques contractiles et aux environ de -60mV pour les cellules automatiques nodales (fig.1).

Au moment de l'excitation, à des phases définies de la systole, la perméabilité aux ions est augmentée (activation de leur conductance) ce qui accroît les mouvements passifs aboutissant à un gain en Na^+ et Ca^{++} intra-cellulaire et à un appauvrissement en K^+ de la cellule.

La dépolarisation cellulaire correspond à une prédominance des courants entrant (Na^+ et Ca^{++}) sur le courant sortant potassique et la repolarisation à l'inactivation des courants entrants sodiques et calcique et à la prédominance du courant sortant potassique. Les mouvements sont fonction du voltage (niveau de membrane) et du temps.

La phase « 0 » : phase de dépolarisation brusque :

Elle correspond à une stimulation qui provoque l'ouverture des canaux à sodium. Les ions Na^+ traversent de façon passive et massive ces canaux, et pénètrent dans la cellule (courant entrant et massif de sodium). La face externe de la membrane devient alors électronégative, et la face interne devient électropositive. Cette phase « 0 » est responsable de la partie ascendante et très brève du potentiel d'action des fibres à potentiel de repos élevé c'est-à-dire des fibres à réponse rapide (fig. 3).

La phase « 1 » : phase de repolarisation initiale ou overshoot :

C'est la portion transitoirement positive du potentiel d'action (c'est-à-dire au-dessus de 0mV). Elle est brève et peu ample et due à la fermeture du canal sodique et l'entrée d'ions Cl^- chlorures.

La phase « 2 » : phase de dépolarisation maintenue (plateau de dépolarisation) :

Elle est due à l'entrée d'ions Ca^{++} par le canal calcique lent et maintient l'état de dépolarisation de la cellule. Les ions Ca^{++} entrées interviennent dans le couplage excitation-contraction.

La phase « 3 » : phase de repolarisation terminale :

Elle correspond à une sortie tardive de K^+ pour compenser l'entrée de Na^+ . Les canaux à sodium se ferment, donc le sodium ne rentre plus. C'est la phase de repolarisation qui correspond à la période où la fibre récupère son excitabilité. Pendant l'hyperpolarisation qui suit la repolarisation, les canaux à potassium restent ouverts. Les ions K^+ continuent à sortir de la cellule. La face externe de la membrane devient alors hyperpositive, et la face interne devient hypernégative.

Enfin, en dernier, la pompe à Na^+ et K^+ interviendra pour expulser le Na^+ hors de la cellule et assurer la rentrée de K^+ dans le milieu intra-cellulaire. L'équilibre ionique est rétabli et la cellule est apte à être dépolarisée de nouveau.

Cette étape nécessite de l'énergie, obtenue par l'hydrolyse de l'ATP, qui est la forme de stockage de l'énergie cellulaire.

La phase 4 : phase de potentiel de repos ou diastole électrique.

Lors de cette phase, le potentiel membranaire de repos des cellules non automatiques (fibres auriculaires et ventriculaires) reste stable par contre celui des cellules automatiques (cellules du tissu nodal) présente une dépolarisation lente spontanée et progressive(ddl) à l'origine de leur activité automatique .

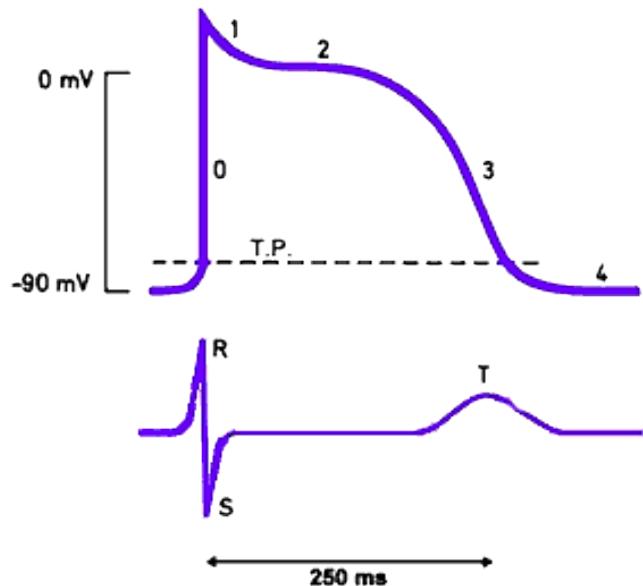


Fig.3 : Aspect du potentiel d'action d'une cellule myocardique commune enregistré par une microélectrode intracellulaire.

- 0 : Phase de dépolarisation brusque.
- 1 : Phase de repolarisation initiale ou overshoot.
- 2 : Phase de dépolarisation maintenue (plateau de dépolarisation).
- 3 : Phase de repolarisation terminale.
- 4 : Phase de potentiel de repos ou diastole électrique.

TP : la ligne pointillée représente le potentiel-seuil. C'est à partir de ce niveau de potentiel d'action que se produit une brusque modification de la perméabilité de la membrane cellulaire vis-à-vis des courants ioniques. A partir de ce niveau se déclenche le potentiel d'action selon la loi du tout ou rien.

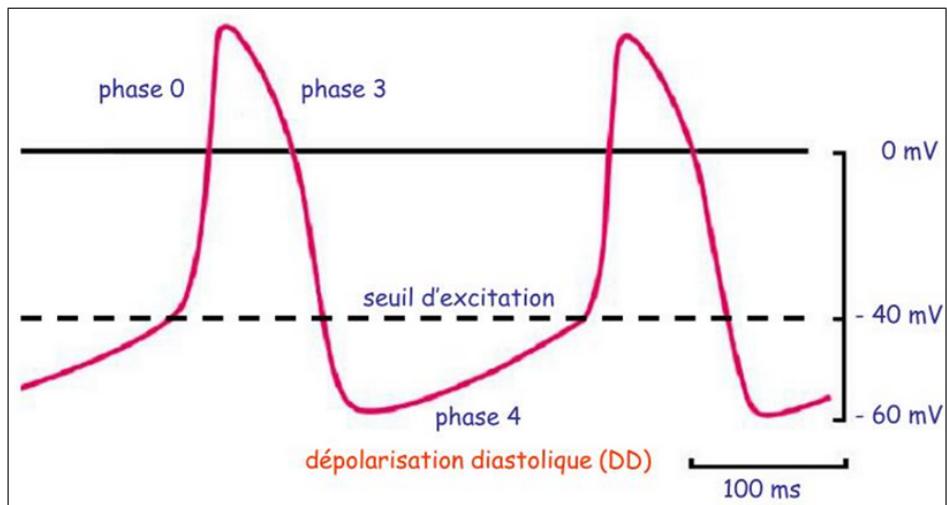


Fig.4 : Mécanismes cellulaires de l'automatisme cardiaque d'une cellule nodale.

Les cellules nodales sont caractérisées par l'absence de potentiel de repos stable qui se situe aux alentours de -60mV . Après chaque potentiel d'action, la membrane se dépolarise spontanément en phase 4. Quand le seuil d'excitation est atteint vers 40mV , un nouveau potentiel d'action est déclenché. Ces cellules sont dites auto-excitables (Fig.4).

2 - 2 Activation cardiaque :

L'activation donne lieu à un courant qui va des cellules activées aux cellules au repos. Le sens de l'activation et le sens du courant sont identiques. L'activation est un dipôle à tête positive et qui parcourt la fibre myocardique d'un bout à l'autre (Fig.5).

Un dipôle est constitué par deux charges électriques de signes contraires (+ et -). Le dipôle a un sens, une orientation et une grandeur. Il peut donc être représenté par un vecteur.

L'activation, phénomène relativement rapide, donne lieu à des différences de potentiel qui s'inscrivent comme une déflexion brève correspondant au complexe QRS sur l'électrocardiogramme.

La repolarisation donne lieu à un courant qui va des cellules encore activées aux cellules déjà repolarisées. Le sens de la repolarisation et celui du courant sont opposés. La repolarisation peut être considérée comme un dipôle qui avance avec la négativité en tête. La repolarisation, phénomène relativement lent, donne lieu à des différences de potentiel qui s'inscrivent comme une déflexion large correspondant à l'onde T sur l'électrocardiogramme.

2-1-4 Les vecteurs cardiaques :

Notion de dipôle électrique :

Le dipôle est un ensemble de charges électriques égales et de signe contraire ($+q$ et $-q$) séparées par une distance d (Fig.6).

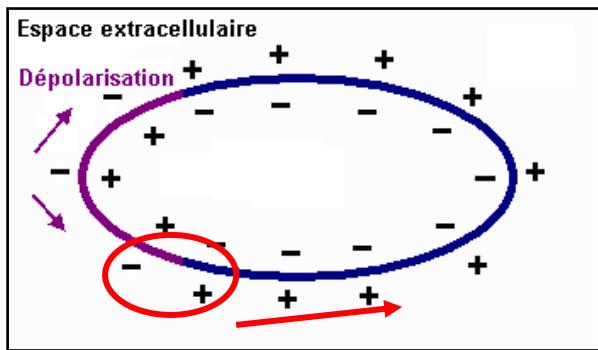


Fig.5 : Dipôle à tête positive laissant derrière lui des charges négatives.
La cellule sera entièrement dépolarisée.

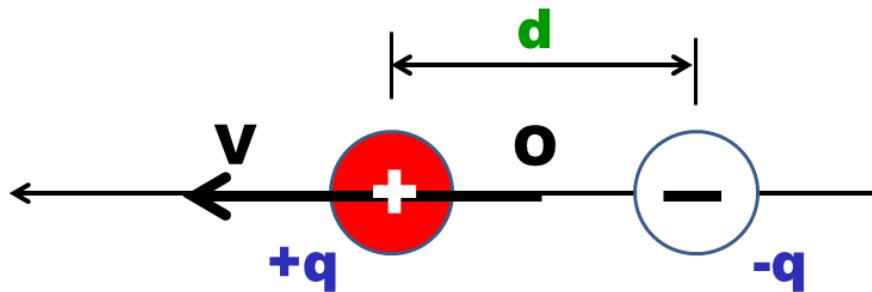


Fig.6 : Un dipôle peut être représenté par un vecteur V caractérisé par :
- son origine : point O situé au centre de $+q$ et $-q$ (potentiel nul)
- sa direction : droite joignant $+q$ et $-q$
- son orientation : de $-q$ vers $+q$ (tête positive)
- son amplitude : proportionnelle au moment du dipôle

Les déflections :

Lorsqu'une fibre est plongée dans un milieu conducteur au moment de son activation, on observe une distribution du potentiel qui est semblable à celle d'un dipôle.

- Le pôle positif en avant de l'onde de dépolarisation.
- Le pôle négatif en arrière de l'onde de dépolarisation.



Pendant la repolarisation, l'orientation est inverse.



L'activité électrique du dipôle peut se représenter par un vecteur caractérisé par sa direction, son sens et son amplitude.

Si on place les électrodes exploratrices dans le milieu conducteur, près de la cellule activée:

Celles placées sur l'axe électrique du dipôle, correspondant à la direction de l'onde d'activation, enregistrent.

- **Une déflexion est +** si elle voit venir le vecteur de dépolarisisation (excitation)
- **Une déflexion est -** si elle voit partir le vecteur de dépolarisation (excitation)

Celles placées en dehors de cet axe enregistrent d'abord une positivité puisqu'elles voient venir le pôle + du dipôle puis une négativité (Fig.7, Fig.8, Fig.9).

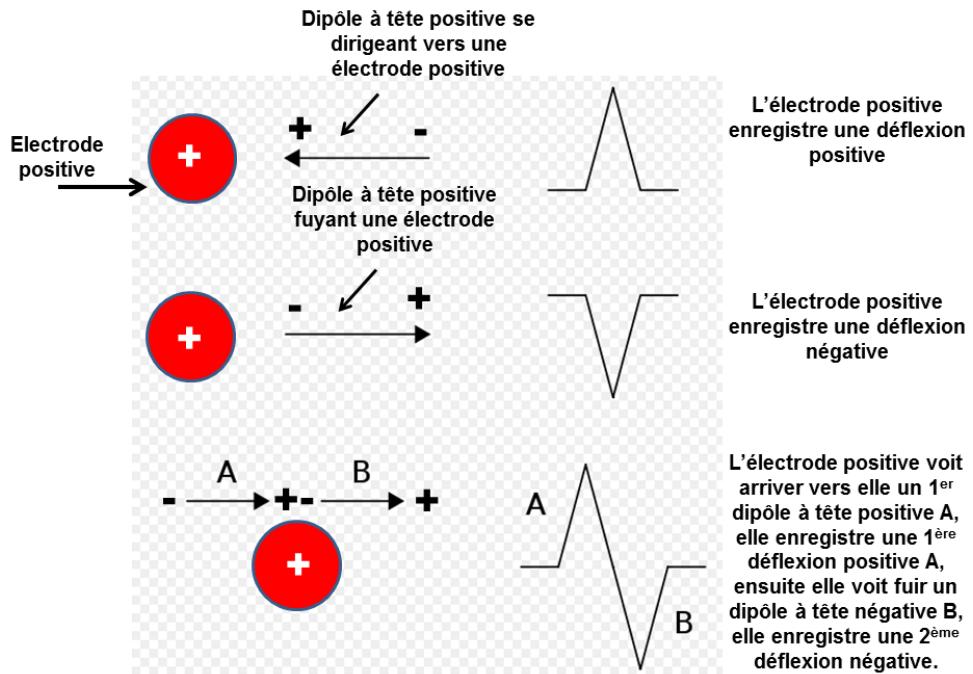


Fig.7 : Différents types d'enregistrement en fonction de la direction et de la polarité des dipôles par rapport à l'électrode exploratrice.

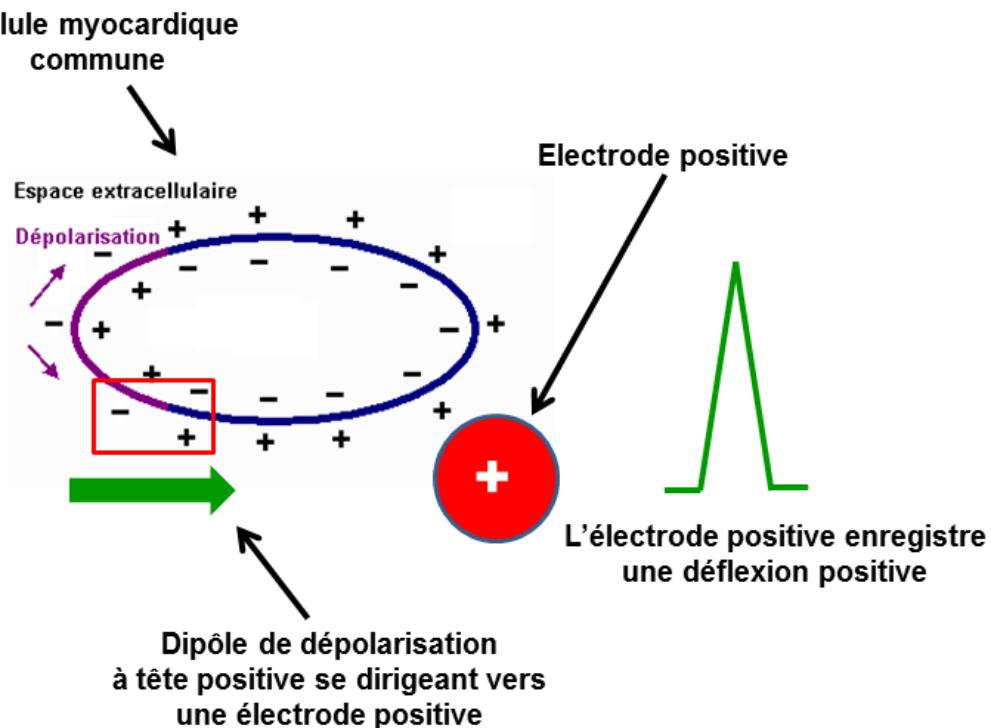


Fig.8 : Enregistrement d'une déflexion positive à partir d'un dipôle de dépolarisation naissant à la surface d'une cellule myocardique et se dirigeant vers une électrode exploratrice positive.

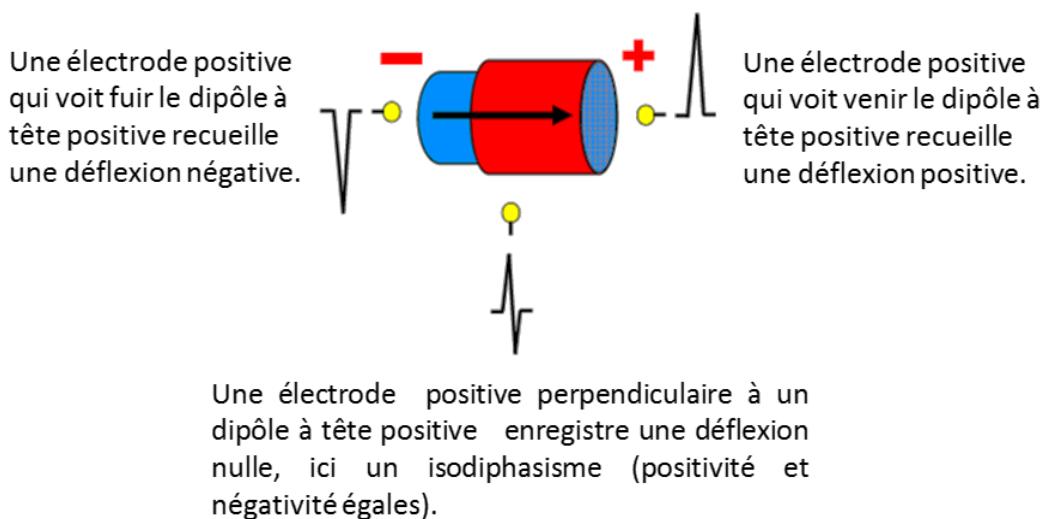


Fig.9 : Inscription graphique du dipôle selon la position de l'électrode.

Remarquez bien qu'une électrode positive placée perpendiculairement au dipôle enregistre un isodiphasisme (les positivités sont égales aux négativités). Plus le dipôle est parallèle à l'électrode plus celle-ci enregistre une positivité ou une négativité en fonction de la direction du dipôle. Cette déflexion est unique (positive ou négative) lorsque l'électrode est totalement parallèle au dipôle. Lorsqu'elle

s'éloignera du dipôle elle sera diphasique (positive et négative ou négative et positive) et lorsqu'elle deviendra perpendiculaire elle enregistrera un isodiphasisme.

2-1-5 Automatisme, excitabilité et conduction cardiaque :

La contraction rythmique et coordonnée du cœur liée à la naissance périodique de l'excitation (automatisme) et à sa progression ordonnée (conduction).

L'automatisme :

C'est la capacité qu'ont les cellules myocardiques nодales (nœud sinusal, nœud d'Aschoff Tawara, faisceau de His et ses branches et tissu de Purkinje de donner naissance par elles mêmes une excitation en se dépolarisant spontanement en phase 4 du potentiel d'action (dépolarisation spontanée diastolique). L'automatisme s'exprime en fréquence par minute. La fréquence spontanée diminue du nœud sinusal (80/mn environ) jusqu'au tissu de Purkinje (30/mn).

Les centres supérieurs de fréquence plus ´levée prennent normalement la commande et inhibent les centres inférieurs. Le nœud sinusal ayant la fréquence la plus ´levée va donc imposer sa fréquence : c'est le chef d'orchestre du cœur.

Les périodes réfractaires :

On dit qu'une cellule est réfractaire quand elle est incapable de répondre ´ un stimulus.

Au repos les cellules myocardiques sont excitables et répondent normalement aux potentiels d'activation des cellules voisines en se dépolarisant, l'intensité minime du stimulus nécessaire pour obtenir une réponse dans ces conditions reprente le "seuil".

Dans les tissus cardiaques la propagation de l'activation ne se fait pas, comme dans un nerf, suivant un câble unique mais dans un réseau de fibres plus ou moins bifurquées et anastomosées qui, sur le plan fonctionnel, constitue pour la conduction un véritable syncytium.

Les cellules du muscle cardiaque sont très reliées entre elles de façon ´ ce qu'une cellule excitée par un stimulus peut exciter les autres cellules. Par conséquent, ces cellules réagissent comme une entité en se contractant autant que possible, chaque fois qu'une cellule est stimulée.

Après l'excitation d'une cellule du muscle cardiaque, aucune excitation ne devrait se produire durant une période relativement longue appelle "**période réfractaire**". Cette période réfractaire relativement longue ´vite une tétanisation ou un spasme du cœur qui interrompait le flux sanguin et provoquerait la mort. L'existence, pour chaque cellule excitée, d'une période réfractaire assure, dans les conditions physiologiques, un **verrouillage qui ´limine les phénomènes de réentrées** globales ou locales, qui peuvent provoquer une fibrillation ventriculaire mortelle.

On distingue les périodes réfractaires suivantes :

- Période réfractaire absolue : PRA (Fig.10 et Fig.11).

Pendant cette phase, la cellule est inexcitable quelle que soit l'intensité du stimulus. Elle correspond ´ la phase 2 et au début de la phase 3 du décours du potentiel d'action. Elle dure donc pendant la plus grande partie du potentiel d'action (PA).

- Période réfractaire relative : PRR (Fig.10 et Fig.11).

La cellule est capable de répondre ´ un stimulus fort, d'intensité supraliminaire que la normale. Les potentiels d'action (PA) sont soit locaux c'est-à-dire non propagés, soit susceptibles d'être propagés mais dont l'amplitude est faible et la vitesse de conduction ralentie.

Cette période survient ´ la phase 3, entre la fin de la période réfractaire absolue (PRA) et le retour au potentiel de repos (PR), caractérisé par le retour ´ un ´tat d'excitabilité diastolique

normale. A mesure que le voltage de la cellule devient plus négatif à la fin de la phase 3, le potentiel transmembranaire peut ne pas avoir atteint sa valeur normale de repos mais être cependant suffisamment négatif pour qu'un stimulus puissant puisse évoquer une réponse.

- Période réfractaire effective ou période réfractaire efficace : PRE

Est la période pendant laquelle la cellule peut être stimulée mais ne conduit pas. La première réponse propagée définit la fin de la période réfractaire effective.

- Période supernormale ou période supranormale ou période vulnérable : SPN

Cette période est située entre la fin de la période réfractaire relative (PRR) et le retour à une excitabilité membranaire diastolique normale. Des potentiels d'action (PA) peuvent être déclenchés par des stimuli d'**intensité infra liminaire** (elle constitue une période de vulnérabilité).

L'excitation pendant cette période peut donner une réponse exagérée et anarchique expliquant le fait que les extrasystoles ventriculaires (ESV) qui tombent sur l'onde T sur l'électrocardiogramme (ESV avec phénomène R/T) ont un caractère dangereux et peuvent déclencher des troubles du rythme cardiaque grave (tachycardie ventriculaire ou fibrillation ventriculaire).

- Le temps de récupération complète : TRC

Il représente le temps nécessaire à une cellule myocardique pour qu'elle retourne à une excitabilité diastolique normale.

- La loi du « Tout ou Rien »

Toute excitation d'une cellule ventriculaire entraîne l'excitation complète des cellules des deux ventricules. En effet, toutes ces cellules sont liées par des ponts perméables inter cellulaires ("gap junction"), créant ainsi un véritable syncytium, d'où une stimulation de toutes les cellules ventriculaires à partir d'une seule.

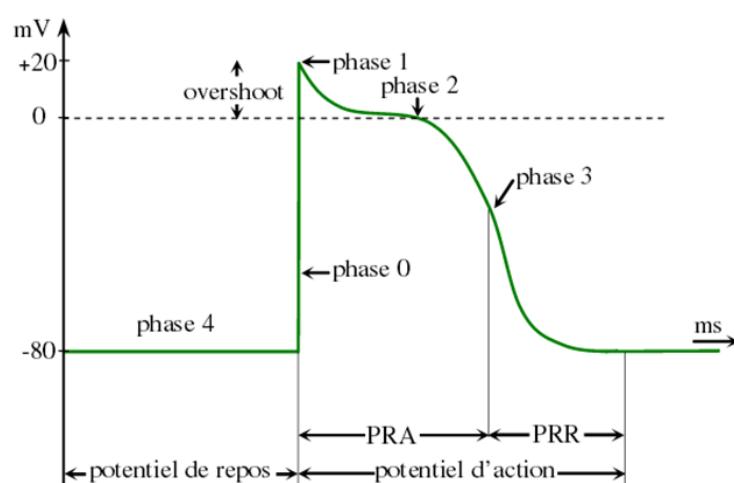


Fig.10 : Position des périodes réfractaires absolue (PRA) et relative (PRR) au niveau du potentiel d'action d'une cellule myocardique commune.

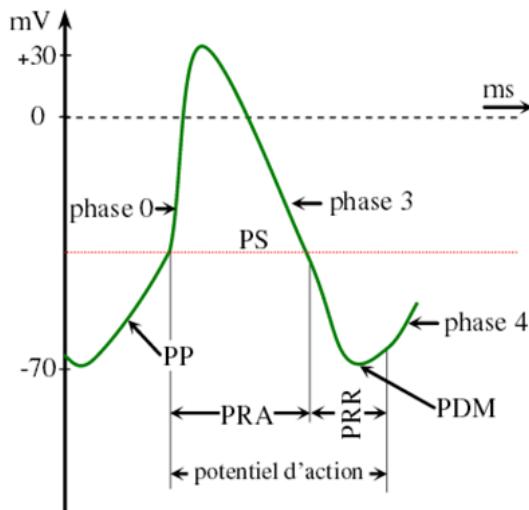


Fig.11: **Position des périodes réfractaires absolue (PRA) et relative (PRR), du potentiel diastolique maximal (PDM) au niveau du potentiel d'action d'une cellule nodale du nœud sinusal. (PP= pente de dépolarisation spontanée diastolique, PS= potentiel seuil.**

Conduction cardiaque :

La conduction consiste dans le fait que chaque cellule myocardique réagit au stimulus que le représentent les potentiels d'action des cellules myocardiques en créant son propre potentiel d'action ce dernier constitue à son tour le stimulus qui réduit la dépolarisation des cellules voisines Ainsi de proche en proche l'excitation progresse à travers tout le cœur.

Contractilité cellulaire cardiaque

La cellule myocardique est assimilée à un ressort : plus la fibre sera tendue, plus la force de contraction sera importante. Jusqu'à un certain point, il y aura pour une fibre donnée un étirement optimal ($2,2\mu$).

Loi de Starling : l'énergie de contraction est fonction de la longueur du muscle avant la contraction : plus le muscle myocardique est étiré, plus la contraction sera importante, jusqu'à un certain niveau.

2-1-6 L'activation cardiaque normale :

Rappel sur le tissu nodal :

Le tissu nodal est un tissu myocardique différencié, spécialisé dans la genèse et la conduction de l'influx électrique depuis le nœud sinusal jusqu'au tissu de Purkinge (2). En plus des mêmes propriétés que le myocarde commun (excitabilité, contractilité, conductibilité), il a donc une propriété supplémentaire qui est l'automatisme.

Anatomiquement, le tissu nodal comprend (Fig.12) :

- **Le nœud sino-auriculaire** appelé aussi **nœud sinusal** situé dans la paroi de l'oreillette droite, près de l'embouchure de la veine cave supérieure.
- **Le tissu de conduction interauriculaire** : 3 voies préférentielles de conduction, qui aboutissent au noeud auriculo-ventriculaire, mais qui interviennent peu à l'état physiologique : faisceau internodal antérieur + un rameau pour l'oreillette gauche (Faisceau de Bachman), faisceau internodal moyen (Wenckebach) et faisceau

internodal postérieur (Thorel). L'existence de ce tissu reste discutable. Ce sont des voies mal individualisées, qui ne constituent pas une structure cardionectrice bien définie. On parle de *voies préférentielles* plutôt que de *voies anatomiques*.

- Le **nœud auriculo-ventriculaire** appelé aussi **nœud d'Aschoff-Tawara** localisé à la base de l'oreillette droite.
- Le **faisceau de His** qui se situe dans le septum membraneux interventriculaire. Il se divise en deux au niveau du ventricule gauche et forme une branche dans le ventricule droit.
- Le **système de Purkinje** qui est un réseau de fibrilles qui se distribue à l'ensemble du myocarde.

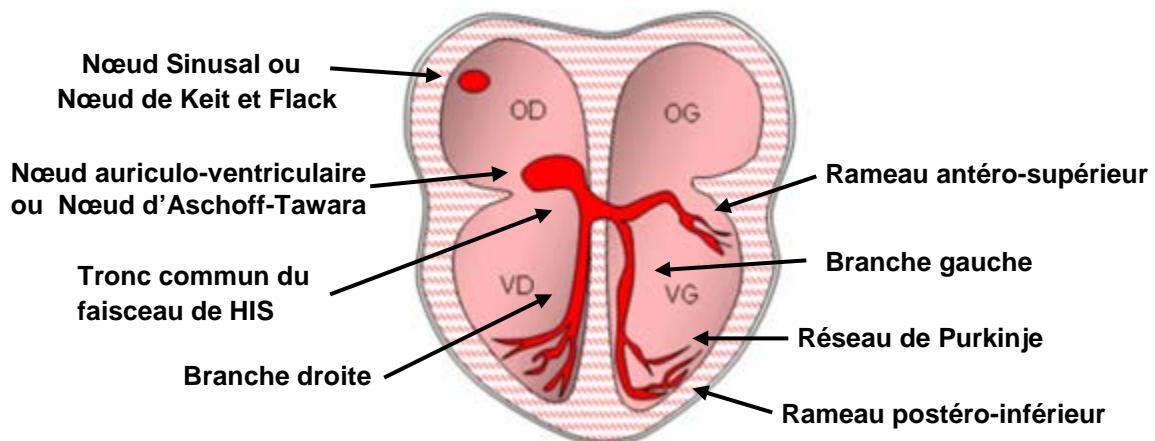


Fig.12. Le tissu nodal
Alain Gallien : Professeur de SVT retraité

Activation électrique du cœur :

L'activité électrique du cœur commence dans le nœud sinusal ou nœud de Keit et Flack ou nœud sino-auriculaire, situé dans l'oreillette droite après l'abouchement de la veine cave supérieure (Fig.12). La dépolarisation auriculaire se fait en tache d'huile par cercles concentriques elle dure normalement moins de 0.10 seconde et donne lieu à **l'onde P** sur l'électrocardiogramme.

L'oreillette droite se dépolarise d'abord (premiers 5 à 6 centimes de second) de haut en bas et d'arrière en avant, ce qui donne lieu à des vecteurs ou dipôles qui pointent vers le bas en avant et un peu à gauche l'activation de l'oreillette gauche donne lieu à des vecteurs ou dipôles qui pointent vers la gauche et en bas et en arrière. Ces vecteurs d'activation se développent dans le sens anti-horaire. Le vecteur moyen de l'onde P est la résultante des vecteurs moyens d'activation droite et gauche. Il est dirigé vers $+50^\circ$ sur les plans frontal et horizontal. (Fig.13).

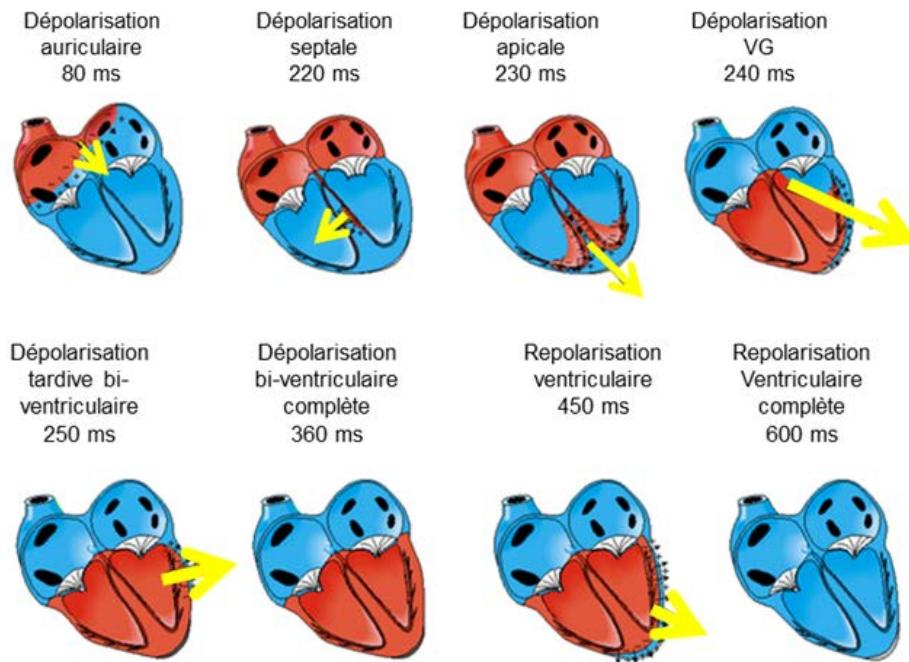


Fig.13 : Représentation des vecteurs de dépolarisation et de repolarisation cardiaque. Remarquez que le premier vecteur de dépolarisation est un vecteur atrial (auriculaire) dirigé en bas et à gauche et que le dernier vecteur de dépolarisation bi-ventriculaire est dirigé vers le bas et à gauche. Notez aussi que le vecteur de repolarisation est dirigé aussi vers le bas et la gauche et suit le vecteur de dépolarisation bi-ventriculaire.

Après la dépolarisation des deux oreillettes, l'activité gagne le myocarde ventriculaire par la voie du système de conduction spécifique constitué par le nœud auriculo-ventriculaire ou nœud d'Aschoff -Tawara, le tronc commun du faisceau de His, les branches droite et gauche de ce faisceau et le tissu de Purkinje. La conduction au niveau du nœud auriculo-ventriculaire est lente assurant ainsi un véritable filtre des impulsions supra-ventriculaires par contre elle est rapide au niveau du système His Purkinje. Le vecteur résultant instantané changera à chaque instant d'amplitude et de direction (Fig.13).

Il existe 3 phases d'activation cardiaque :

1^{er} vecteur : activation septale (Fig.14).

2^{ème} vecteur : activation des parois libres (Fig.15).

3^{ème} vecteur : activation basale (Fig.16).

Activation septale : 1^{er} vecteur :

L'activation septale débute au tiers moyen de la face gauche du septum interventriculaire, à l'origine d'un **vecteur** initial orienté en avant et à droite et, suivant l'horizontalisation du cœur, vers le bas ou le haut.

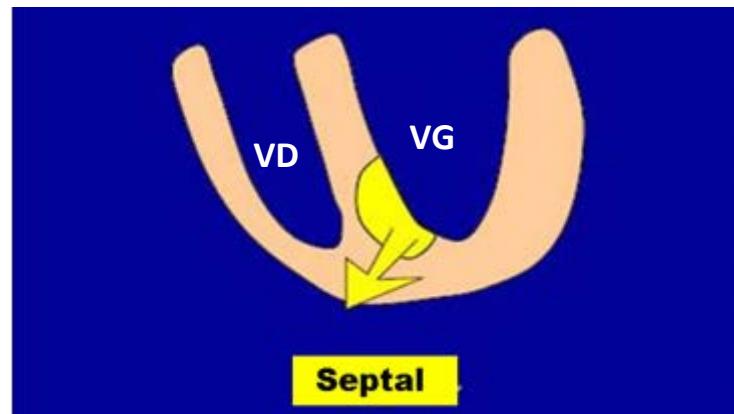


Fig. 14 : 1^{er} vecteur : activation septale.

Activation des parois libres : 2^{ème} vecteur :

Parvenu à l'apex, l'influx se propage le long des bords libres des ventricules grâce au réseau de conduction spécialisée (**réseau de Purkinje**). Comme les vecteurs gauches prédominent sur les vecteurs droits, le **vecteur résultant** est orienté en arrière et à gauche.

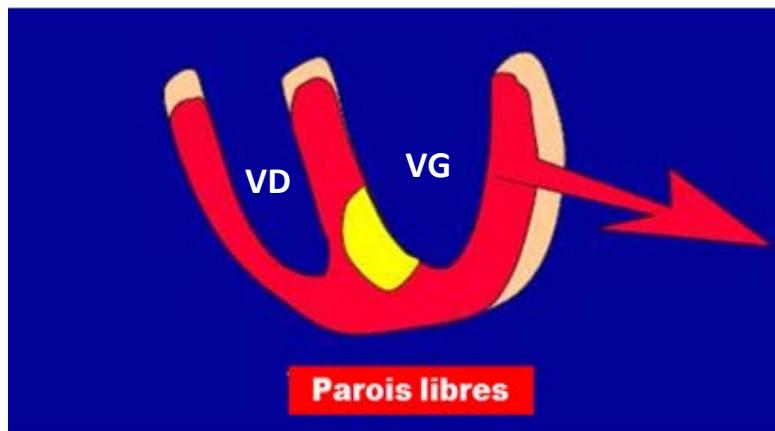


Fig. 15 : 2^{ème} vecteur : activation des parois libres.

Activation basale : 3^{ème} vecteur :

Enfin, l'activation des parties postéro-basales des deux ventricules et du septum donne un **dernier vecteur**, plus petit, dirigé en arrière, à gauche ou légèrement à droite et vers le haut.

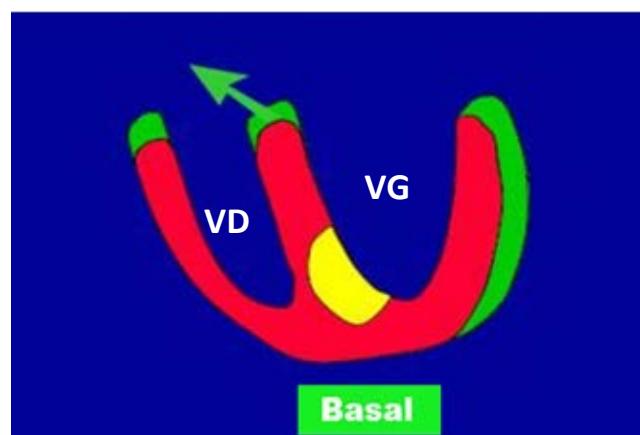


Fig. 16 : activation des parois basales.

3. BASES PHYSIQUES DE L'ELECTROCARDIOGRAPHIE :

L'enregistrement de l'activité électrique du cœur, au moyen d'électrodes placées sur la surface du corps, repose sur certaines hypothèses. Ces hypothèses, apparemment fausses sont pourtant assez proches de la réalité et conduisent à des résultats suffisamment bons pour qu'on puisse les accepter comme des "postulats".

Hypothèse d'Einthoven (3) (4).

Willem Einthoven a posé en postulat 3 points: (Fig. 17) (Fig. 18)

1^{er} point : Le corps humain représente un milieu conducteur homogène (milieu de résistivité homogène).

2^{ème} point : A condition d'être suffisamment éloigné du cœur, c'est-à-dire en se plaçant à la surface du corps, dans le plan frontal, on peut considérer l'ensemble des cellules cardiaques comme un dipôle unique équivalent à la somme des vecteurs élémentaires : **vecteur résultant**.

3^{ème} point : Le dipôle cardiaque peut être considéré comme situé au centre d'un triangle équilatéral dont les sommets sont :

- l'épaule droite
- l'épaule gauche
- le pubis
- Les dérivations D1, D2 et D3 forment les côtés d'un triangle équilatéral dont le cœur occupe le centre (**Triangle d'Einthoven**).

Le problème étant ainsi simplifié, **Einthoven** compléta ses hypothèses par la loi qui porte son nom et qui est valable même si l'on n'admet pas la validité des hypothèses. Cette loi d'Einthoven n'est que l'application au cœur de la loi de Kirchoff selon laquelle la somme algébrique des différences de potentiel dans un circuit fermé est égale à zéro.

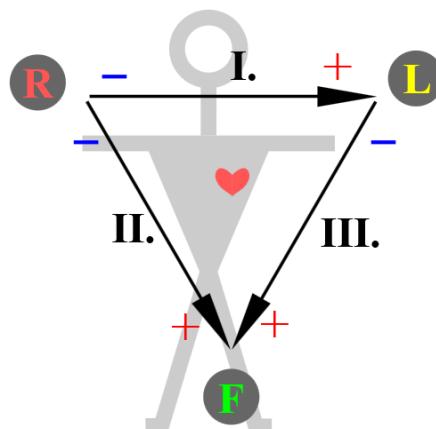


Fig. 17 : Le triangle équilatéral d'Einthoven élaboré selon son postulat en 3 points.

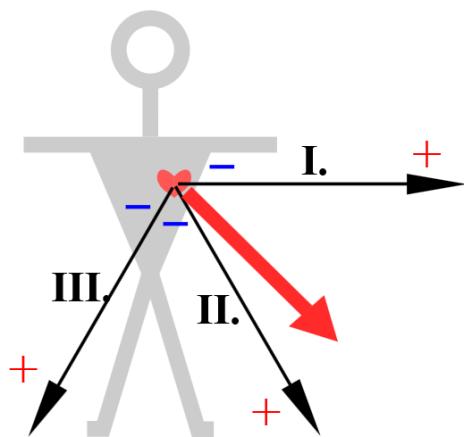


Fig.18 : Translation des dérivations du triangle équilatéral d'Einthoven. Comme chaque angle d'un triangle équilatéral mesure 60° , chaque dérivation est séparée aussi de 60° (entre D1 - D2, il y a 60° et entre D2 - D3, il y a 60°).

Ainsi l'électrocardiogramme va être l'enregistrement à la surface du corps des variations du champ électrique produit par l'activation cardiaque.

Pour l'enregistrement, on doit disposer d'un système d'électrodes qu'on placera à la surface connectées 2 par 2 à un galvanomètre.

La disposition des électrodes et leurs connections s'appellent : **Dérivations**.

4. REALISATION DE L'ELECTROCARDIOGRAMME:

Le matériel (Fig.19)



Fig.19 : Modèle d'un appareil d'électrocardiographie.

Les appareils électrocardiographiques inscrivent les enregistrements sur du papier thermosensible, bien qu'actuellement l'enregistrement soit de plus en plus digitalisé. Ils enregistrent l'activité électrique du cœur, qui est captée par des plaques placées en divers points, appelés dérivations. L'enregistrement des douze dérivations habituelles (I, II, III, VR, VL, VF et de V1 à V6) peut se faire successivement ou simultanément (3, 6 ou les 12

dérivations en même temps) dépendant du nombre de canaux dont dispose l'appareil. L'enregistrement est réalisable donc sur une, trois ou six pistes selon les types d'appareils.

Le courant électrique généré par le cœur est conduit à travers les câbles de l'appareil d'enregistrement. L'aiguille se déplace en fonction de la grandeur du signal électrique généré par le patient. Ce signal possède une représentation vectorielle. L'aiguille inscrit une défexion positive ou négative selon si l'électrode exploratrice est face à la tête ou à la queue du vecteur de dépolarisation ou de repolarisation (qui correspond à la charge positive du dipôle) et indépendamment du déplacement de la force électrique de la dérivation concernée.

Le réglage de l'appareil

1. Vérifier que la ligne isoélectrique soit au centre du papier enregistreur (selon le type d'appareil).
2. Vérifier que la vitesse d'enregistrement soit de 25mm/seconde.
3. Vérifier que l'amplification soit à 1mV.
4. Enclencher les filtres selon la qualité du tracé.
5. Si malgré les filtres et/ou le relâchement musculaire optimal du patient le tracé reste perturbé, connecter l'appareil à une autre prise.

La préparation du patient

6. Informer le patient.
7. Se frictionner les mains avec une solution hydro-alcoolique.
8. Installer confortablement le patient.
9. Dégraisser la peau à l'eau et au savon, bien sécher, tondre si nécessaire.
10. Se frictionner les mains avec la solution hydro-alcoolique.
11. Mouiller les électrodes avec un peu d'eau ou avec le spray ou mettre de la pâte conductible sur la peau
12. Placer les électrodes en respectant les repères squelettiques :

Les renseignements à prendre :

13. Nom, prénom, date de naissance (étiquette).
14. Date et heure de l'enregistrement.
15. Numéro de l'electrocardiogramme.
16. Médicaments en cours ou administrés avant.
17. Douleurs thoraciques existantes ou non.
18. Pacemaker implanté oui ou non.

Le papier d'enregistrement

Le papier est millimétré avec un quadrillage renforcé tous les 5 mm ; un petit carré de 1 mm représente en abscisse 0,04 sec quand la vitesse de déroulement du papier est de 25 mm/secondes et en ordonnée 1 mV (Fig. 20) (Fig.21).

- Enregistrement sur papier millimétré
- Déroulement à vitesse standard = 25mm/s \rightarrow 1 mm = 0,04 sec
- 10 mm = 1mV, soit 1 mm = 0,1 mV

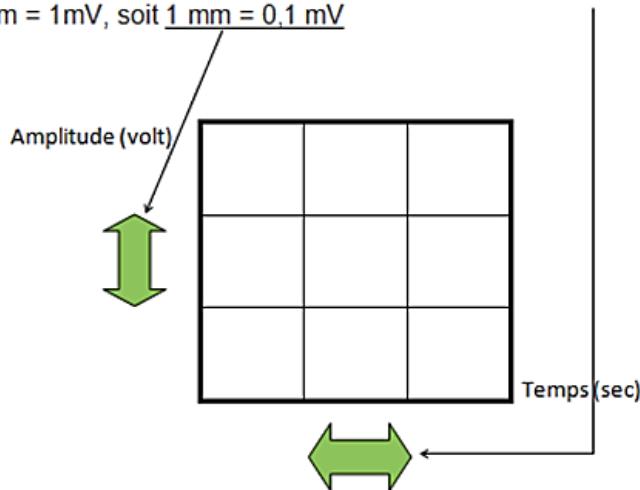


Fig. 20 : Présentation du papier d'enregistrement de l'électrocardiogramme.

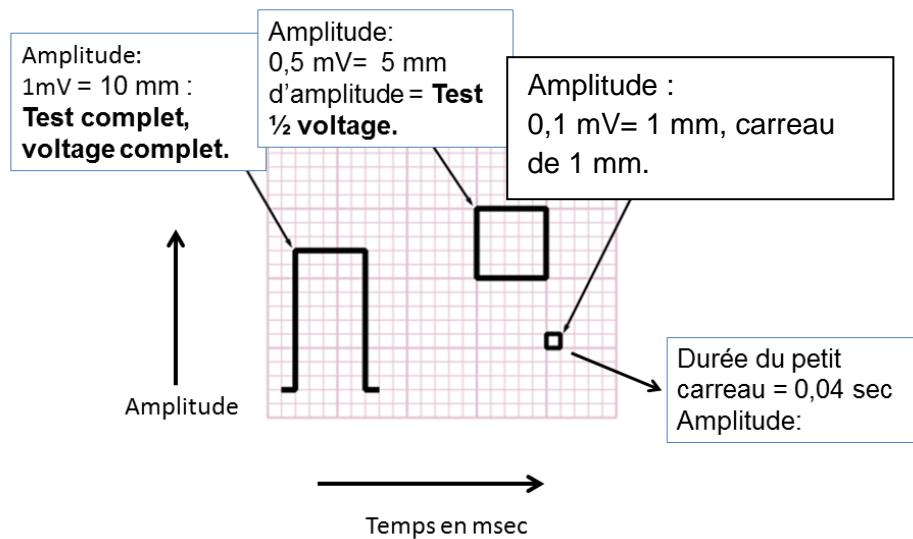


Fig. 21 : Etalonnage de l'amplitude et de la durée sur le papier millimétré de l'électrocardiogramme.

L'unité Ashman (Ashman's unit) (Fig. 22).

Unité de temps/voltage utilisée en électrocardiographie. Elle représente sur l'électrocardiogramme normal une surface de 1mm^2 correspondant à la surface du plus petit carreau de 1mm de côté représentant 4microvolts/seconde.

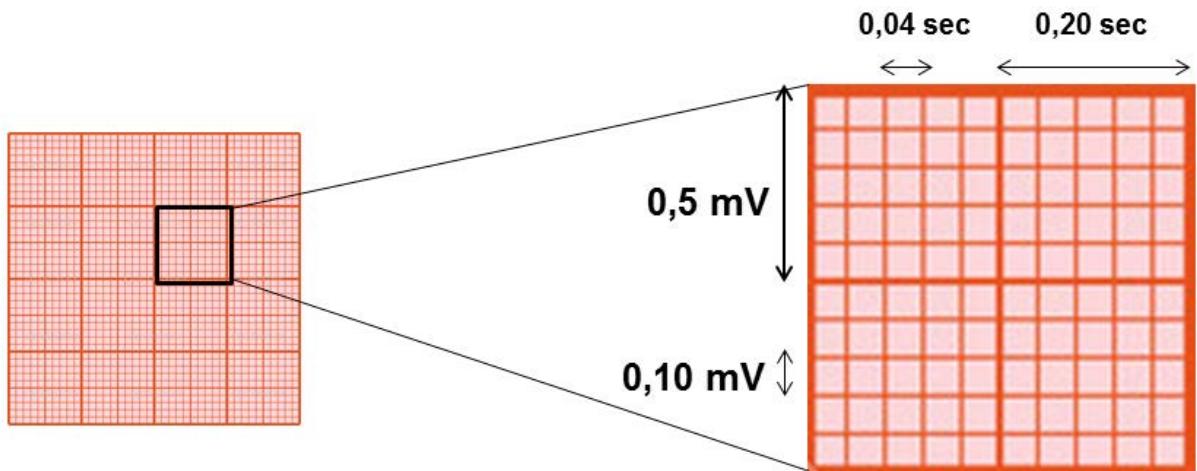


Fig. 22 : Papier millimétré d'enregistrement avec graduation de la valeur dans le sens vertical (voltage) et horizontal (temps). Les valeurs correspondent à une vitesse du papier de 25mm/sec.

L'étalonnage

L'étalonnage standard de l'électrocardiogramme enregistre en ordonnée une déflexion de 10 mm pour un voltage de 1 mv. Un étalonnage correct est indispensable à l'interprétation des tracés (Fig. 23).

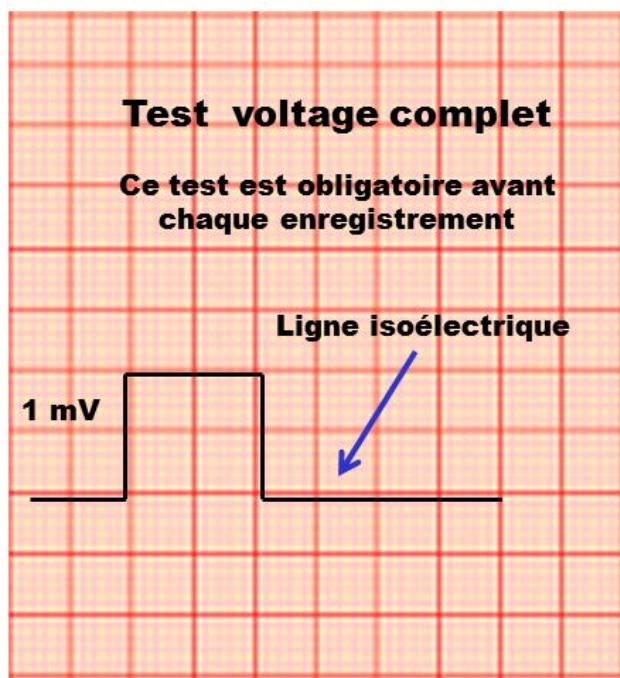


Fig. 23 : Enregistrement sur papier millimétré de l'électrocardiogramme du test d'étalonnage : **voltage complet**

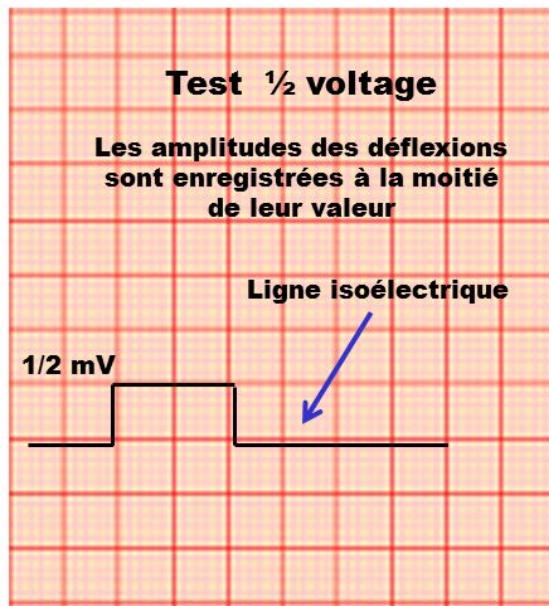
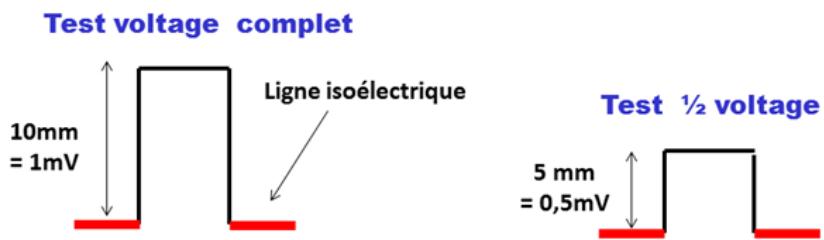


Fig. 24 : Enregistrement sur papier millimétré de l'électrocardiogramme du test d'étalonnage : **1/2 voltage**.

L'enregistrement de l'électrocardiogramme est réalisé en $\frac{1}{2}$ voltage lorsque les déflexions QRS sont de grandes amplitudes et ne peuvent être enregistrées complètement. Il faut par conséquent multiplier par 2 l'amplitude des déflexions enregistrées pour avoir leur valeur réelle (Fig. 24).

La ligne isoélectrique du voltage-test est au niveau zéro et correspond à un voltage nul (Fig. 25).

La ligne isoélectrique est exactement à 0 mV et correspond aux segments isoélectriques PQ, ST et au point J.



La ligne isoélectrique est exactement à 0 mV et correspond aux segments isoélectriques : PQ, ST et au point J.

Fig. 25 : la ligne isoélectrique.

5. LES DERIVATIONS: (5)

Une dérivation est l'ensemble du circuit constitué par deux électrodes placées sur un sujet et reliées aux 2 bornes d'entrée d'un électrocardiographe.

Les électrodes que l'on place sont visibles sur la figure 26.



Fig. 26 : **Les électrodes périphériques et précordiales.**

Il est classique de distinguer 2 types de dérivation :

- Les dérivations bipolaires.
- Les dérivations unipolaires.

Dans les dérivations bipolaires les deux électrodes sont exploratrices.

Une dérivation unipolaire comporte bien deux électrodes : mais l'une recueille les informations, c'est l'électrode exploratrice, l'autre ne sert qu'à fermer le circuit, c'est l'électrode indifférente, placée hors d'atteinte des différences de potentiel étudiées.

L'électrocardiogramme permet l'exploration de l'activité électrique du cœur dans un **plan frontal** et dans un **plan horizontal** par le biais de **dérivations** standards périphériques bipolaires, unipolaires périphériques et unipolaires précordiales.

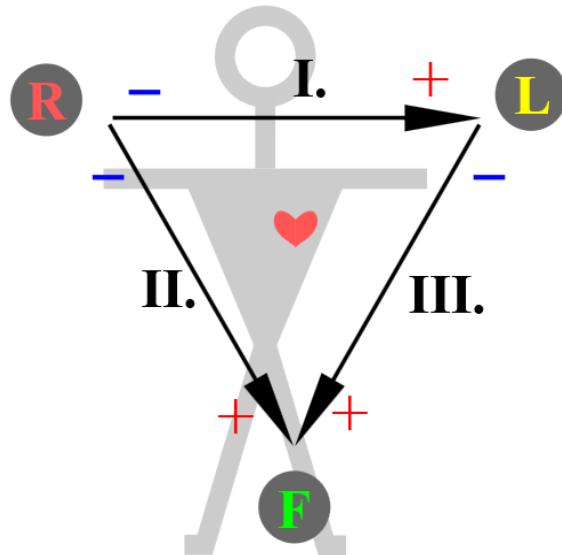
Les dérivation périphériques des membres :

Ces dérивations explorent le plan frontal ou vertical.

On distingue :

- Les dérивations bipolaires des membres dites « dérivation STANDARDS »
- et - Les dérivation unipolaires des membres.

Dérivation bipolaires des membres dites « dérivation STANDARDS » : D1- D2 - D3.



Selon la théorie d'Einthoven, le cœur est au centre d'un triangle équilatéral dont les côtés forment les dérivations. Les électrodes sont placées aux extrémités des membres. Chaque angle du triangle est à 60°.

D1 : (I)

Electrode négative (-) au bras droit.

Electrode positive (+) au bras gauche.

D2 : (II)

Electrode négative (-) au bras droit.

Electrode positive (+) à la jambe gauche.

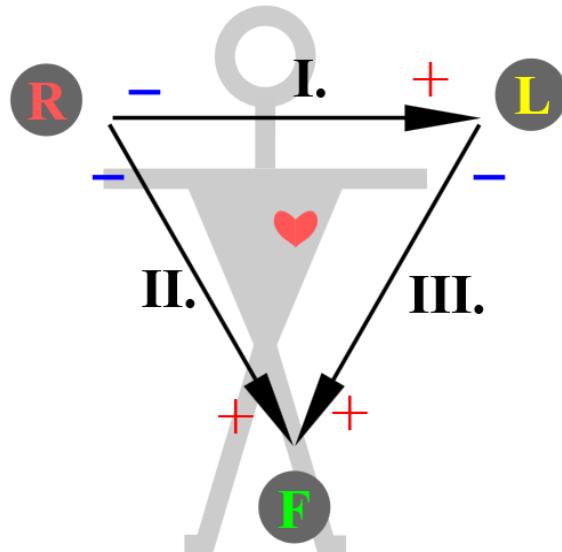
D3 : (III)

Electrode négative (-) au bras gauche.

Electrode positive (+) à la jambe gauche.

Dérivations unipolaires des membres

Ils sont au nombre de 3 et correspondent aux sommets du triangle d'Einthoven.



VR : rouge

Electrode positive (+) au bras droit.

Electrode négative (-) = indifférente.

VL : jaune

Electrode positive (+) au bras gauche.

Electrode négative (-) = indifférente.

VF : vert

Electrode positive (+) à la jambe gauche.

Electrode négative (-) = indifférente.

Pour augmenter l'amplitude des potentiels, Gold Berger utilise ce qu'on appelle les dérivations unipolaires augmentées. La nomenclature de ces dérivations est la suivante : **aVR, aVL aVF** ;

a = amplification.

V = Voltage.

R, L, F = Right, Left et Foot désignant la position de l'électrode (+) exploratrice au niveau des membres.

Quand on combine le système triaxial des dérivations standards et le triaxe des dérivations amplifiées, on forme donc la figure hexa-axiale de BAYLEY-CABRERA dont les axes sont séparés chacun de 30°, les dérivations amplifiées étant perpendiculaires aux dérivations standards. Ce double triaxe est une référence utile pour tracer les vecteurs cardiaques moyens dans le plan frontal (Fig.27).

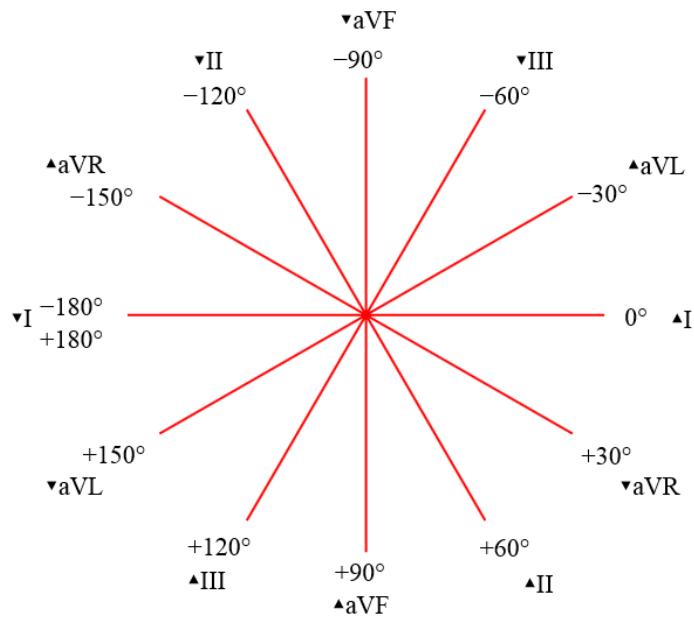
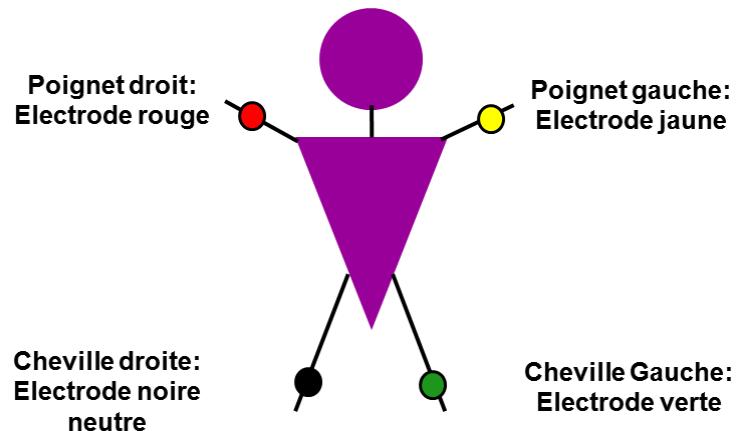


Fig. 27 : La figure hexa-axiale de référence de BAYLEY-CABRERA avec schématisation des angles

Mise en place des électrodes périphériques

Vous trouverez ci-après comment on place les électrodes en fonction de la couleur des électrodes.

Pour les dérivations standards : 4 électrodes comme suit :



- █ - jaune au poignet gauche.
- █ - rouge au poignet droit.
- █ - vert à la cheville gauche.
- █ - noire à la cheville droite, cette électrode est neutre et est reliée à la terre.

Il existe 2 moyens mnémotechniques pour retenir l'emplacement et les couleurs des électrodes :

1. Le sang (rouge) sur le bitume (**noir**), le soleil (jaune) sur la prairie (vert).

2. Rien **N**e Va Jamais (Rouge **N**oir **V**ert **J**aune).

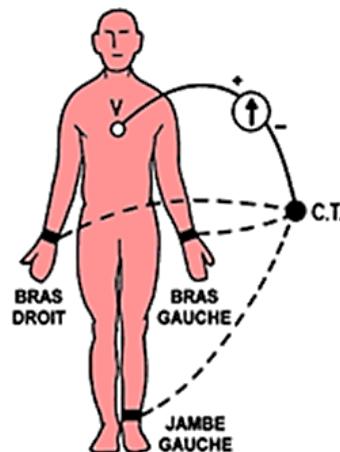
Pour les précordiales : 6 électrodes de base comme suit :

V1 rouge  V2 jaune  V3 vert  V4 marron  V5 noire  V6 bleue 

Pour les dérivations précordiales V7 V8 V9 V3R V4R, on reprend les électrodes décrites précédemment en notant la correspondance couleur-déivation utilisée.

Les dérivations précordiales

Les dérivations précordiales sont des dérivations unipolaires thoraciques qui enregistrent l'activité électrique cardiaque dans le **plan horizontal**. Comme il s'agit de dérivations unipolaires, l'électrode exploratrice recueille d'importantes variations de potentiel alors que l'autre électrode est connectée au Central Terminal selon Wilson (Fig. 28).



CT : borne centrale.
V : électrode exploratrice.

Fig. 28 : **Le Central Terminal selon Wilson**

Ce sont des dérivations "rapprochées" car l'électrode exploratrice est placée en divers points de l'aire précordiale, à faible distance de l'épicarde, face aux parois du ventricule droit et gauche. Les électrodes exploratrices sont placées de façon immuable comme suit :

L'American Heart Association a défini la position des électrodes précordiales usuelles (au nombre de 6) comme suit : (Fig. 29, Fig.30, Fig.31). (6)

- - V1 : 4e espace intercostal au bord droit du sternum;
- - V2 : 4e au bord gauche du sternum;
- - V3 : à mi-distance entre V2 et V4;

- V4 : 5e espace intercostal gauche sur la ligne médio-claviculaire;
- V5 : même niveau horizontal que V4 sur la ligne axillaire antérieure gauche;
- V6 : même niveau horizontal que V4 et V5 sur la ligne axillaire moyenne gauche.

Dans certains cas, on peut ajouter :

Les électrodes précordiales complémentaires droites (au nombre de 2) :

V3R: localisation symétrique à V3 sur l'hémithorax droit à mi-distance entre V1 et V4R.

V4R: localisation symétrique à V4 sur l'hémithorax droit au 5ème espace intercostal, ligne médio-claviculaire **droite**.

Ces 2 dérivations (V3R et V4R) servent à faire le diagnostic de l'hypertrophie ventriculaire droite et de l'infarctus du ventricule droit.

Les électrodes précordiales complémentaires postérieures (au nombre de 3) :

V7: même niveau horizontal que V4, ligne axillaire postérieure.

V8: même niveau horizontal que V4, pointe de l'omoplate.

V9: même niveau horizontal que V4, entre V8 et les épineuses postérieures du rachis.

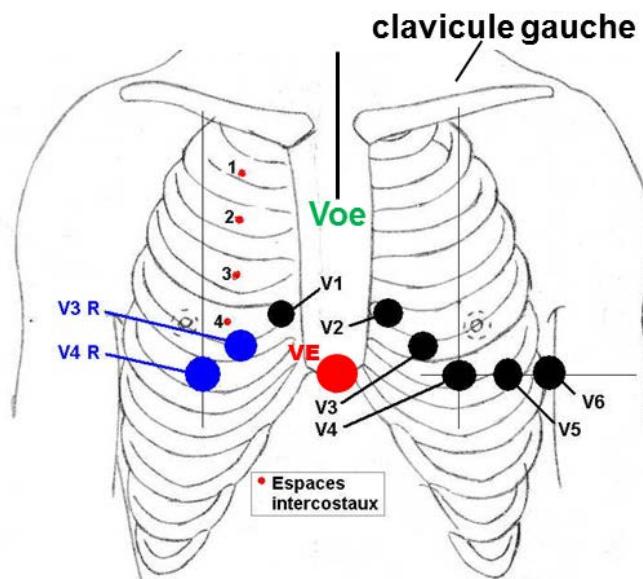


Fig. 29 : **Position des électrodes précordiales complémentaires droites:**

V3R: à mi-distance entre V1 et V4R

V4R: 5ème espace intercostal, ligne médio-claviculaire **droite**

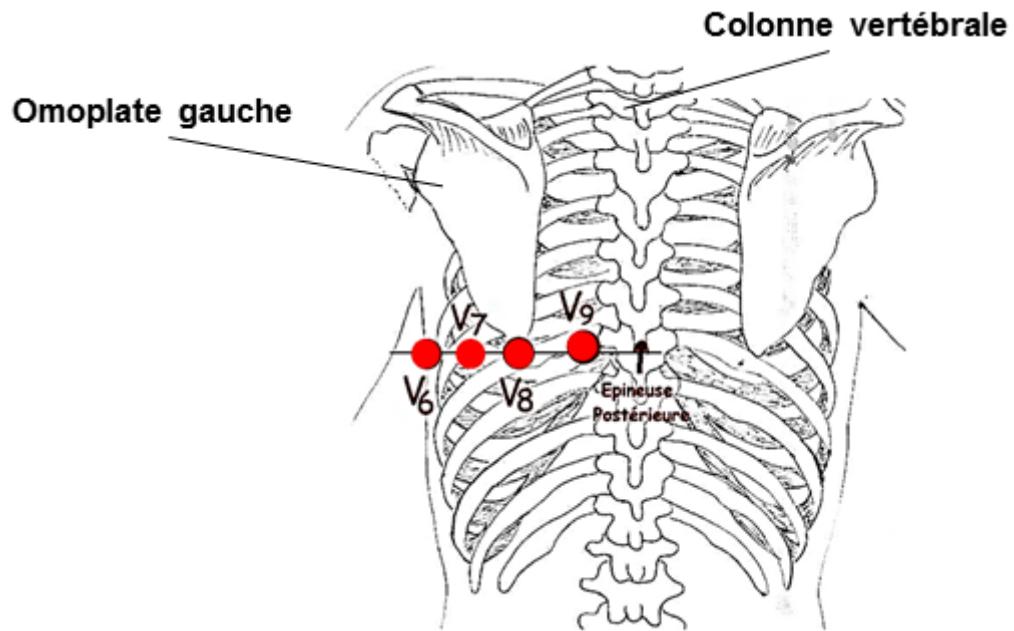


Fig. 30 : **position des électrodes précordiales complémentaires postérieures (sur le dos):**

V7: même niveau horizontal que V4, ligne axillaire postérieure

V8: même niveau horizontal que V4, pointe de l'omoplate

V9: même niveau horizontal que V4, entre V8 et les épineuses postérieures du rachis

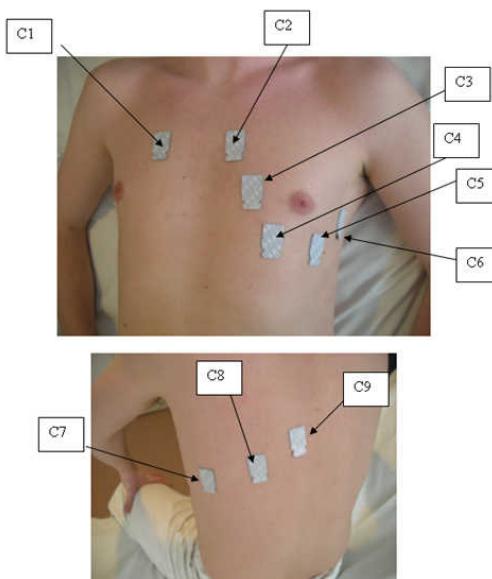


Fig.31 : **Positionnement de l'ensemble des électrodes précordiales sans les électrodes droites (V3R et V4R).**

Nombre des électrodes :

Le nombre total des électrodes précordiales est de 11.

Le nombre total des électrodes périphériques est de 6.

Le nombre total des électrodes est de 17.

En cas de douleur thoracique aigue, il est nécessaire de pratiquer en urgence un électrocardiogramme **17 dérivations** en urgence.

6. LES DEFLEXIONS, LE TRACE :

Les artéfacts de l'électrocardiogramme

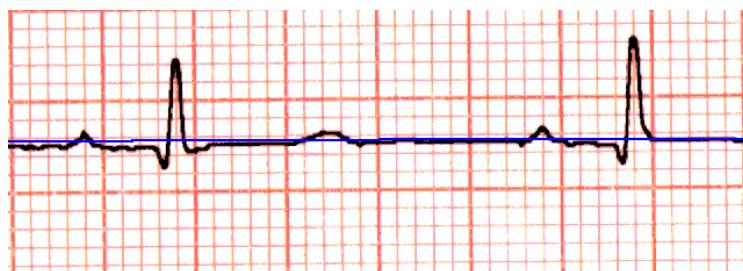
Le tracé électrocardiographique peut être déformé par différents artéfacts qui sont dus aux mouvements du sujet, à une mauvaise technique de l'opérateur ou à des défauts mécaniques de l'appareil.

Les artéfacts les plus courants sont :

- Le tremblement musculaire caractérisé par de petites oscillations irrégulières de fréquence variable qui se superposent au tracé et qui sont dues à la tension musculaire.
- Le courant alternatif par ondes régulières en dents de soie qui se produisent à la cadence de 50/sec et sont dues à l'interférence de l'équipement électrique qui fonctionne sur le même circuit.
- L'instabilité de la ligne de base caractérisé par des montées et des descentes lentes ou brusques du tracé et est due soit à des contacts mal serrés ou mal nettoyés (électrode peau ou électrode fil) soit à des mouvements respiratoires.

Terminologies et normes (7)

Sur un tracé électrocardiographique (Fig.33), le premier repère est **la ligne isoélectrique** (Fig.32). Elle est la ligne de base correspondant à l'absence de phénomène électrique. Au-dessus de celle-ci, on parle d'onde positive, en dessous, d'onde négative. Une onde peut être aussi diphasique si une partie de celle-ci se situe au-dessus et l'autre partie au-dessous de la ligne isoélectrique. Toutes les ondes se mesurent du début de leur phase initiale, à la ligne isoélectrique.



Test voltage complet

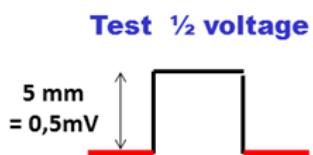
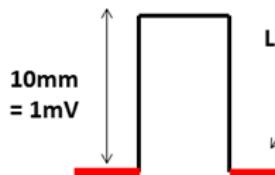


Fig.32 : La ligne isoélectrique.

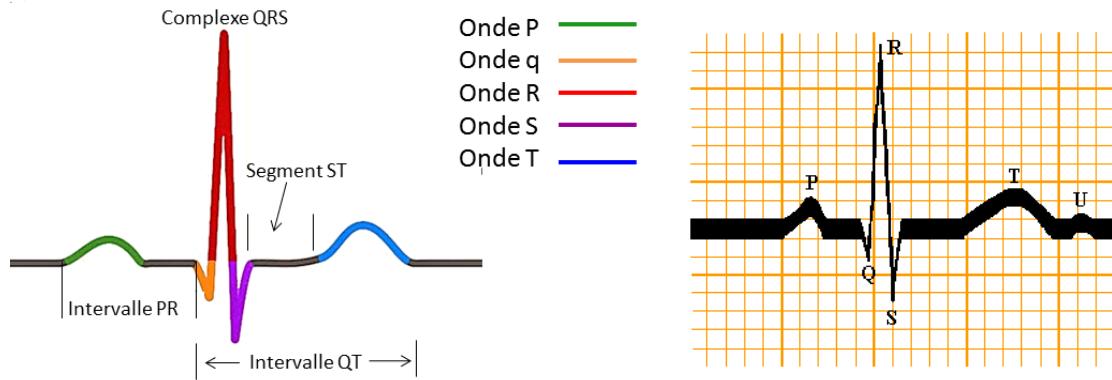


Fig.33 : Tracé d'un électrocardiogramme.

L'onde P correspond à la contraction de l'oreillette, les ondes QRS correspondent à la contraction des ventricules et l'onde T correspond à l'onde de repolarisation des ventricules.

L'onde P (Fig.34) représente la dépolarisation auriculaire. Cette onde monophasique et symétrique dans la majorité des cas, va permettre la contraction des oreillettes. Sa durée est inférieure à 0,10 s (en moyenne 0,08 sec) et son amplitude inférieure ou égale à 2,5 mm, maximale en DII et V1 où elle est mieux visible. Son axe moyen est compris entre +20 et +80°. Elle a un aspect quelquefois diphasique habituel en V1.

L'onde P sinusale est toujours négative en aVR et positive en DI et DII.



Fig.34 : L'onde P.

L'intervalle PR (Fig.35), se calcule du début de l'onde P au début du complexe QRS. Il représente la conduction auriculo-ventriculaire. C'est le temps nécessaire à l'influx pour dépolarisier les oreillettes puis franchir le nœud auriculo- ventriculaire et le tronc du faisceau de His. Il est de 0,12 à 0,20 seconde chez l'adulte.

Les valeurs extrêmes sont les suivantes en fonction de l'âge :

0.12 à 0.14 sec pour le nouveau-né et le nourrisson.

0.12 à 0.18 sec pour l'adolescent.

0.12 à 0.20 sec pour l'adulte.

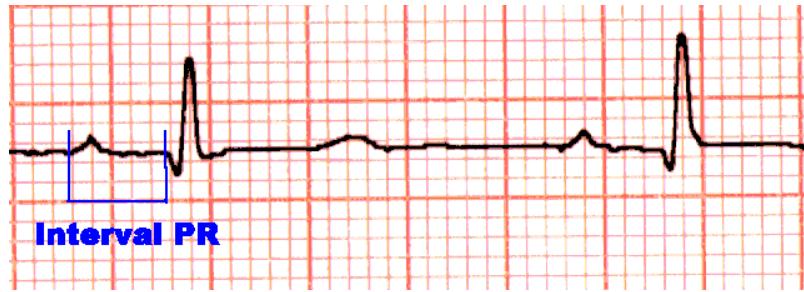


Fig.35 : L'intervalle PR.

Le segment PQ : commence à la fin de l'onde P et se termine au début du complexe QRS.

Le complexe QRS (Fig.36) représente l'activation et la dépolarisation ventriculaire de l'endocarde vers l'épicarde qui va permettre la contraction des ventricules. Il a des morphologies différentes selon la dérivation où on le lit. Il est constitué de trois segments :

L'onde Q : première déflexion négative : activation septale.

L'onde R : première déflexion positive : activation pariétale du VG.

L'onde S : défection négative qui suit l'onde R : activation basale du VG.



Fig.36 : Le complexe QRS.

La durée de l'ensemble QRS varie de 0,06 à 0,10 seconde (en moyenne 0,08 sec) et se mesure du début du QRS jusqu'à la fin de la dernière onde : onde S ou R, selon le cas, sa durée varie de 0.06 à 0.10 secondes avec une valeur moyenne de 0.08 secondes.

L'onde q normale ne doit jamais dépasser 0.04 seconde de durée.

Les temps d'apparition de la déflexion intrinsécoïde se mesure du début de QRS au sommet de R. En V1, ils peuvent atteindre : 0.03 sec et en V6 : 0.04 sec.

Les limites physiologiques de l'axe moyen de QRS sont de -30° à $+110^{\circ}$ (en moyenne entre 0° et 90°).

L'amplitude se mesure en mm et, par convention, une onde d'amplitude < 5 mm s'écrit en minuscules : q, r, s. Une amplitude > 5 mm s'écrit en majuscule.

Cette convention permet de décrire différents aspects : qRS, QrS, QS, RS, rSr'... (Fig.37)

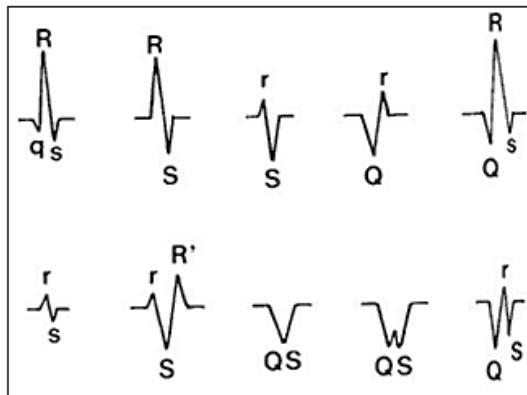


Fig.37 : Nomenclature des déflexions du complexe « QRS ».

Le segment ST (Fig.38), se raccroche au complexe QRS au point nommé **J**. Ce segment est posé sur la ligne isoélectrique, il est dit : iso-électrique. Le raccordement à l'onde T qui suit, est progressif.

Il correspond à la période d'excitation uniforme des ventricules jusqu'à la phase de récupération des ventricules.

On mesure de la fin de l'onde S ou R jusqu'au début de l'onde T. Il est normalement horizontal ou légèrement oblique +/- isoélectrique. Un sus-décalage ou un sous-décalage de plus d'1 mm par rapport à la ligne isoélectrique est anormal.



Fig.38 : Le segment ST.

Le point J (Fig.39), point défini par l'intersection entre la fin du complexe QRS (fin de la dépolarisation) et le début du segment ST (début de la repolarisation). C'est par rapport au segment PQ (ligne de base) qu'on recherche un décalage du point J (sus ou sous-décalage).

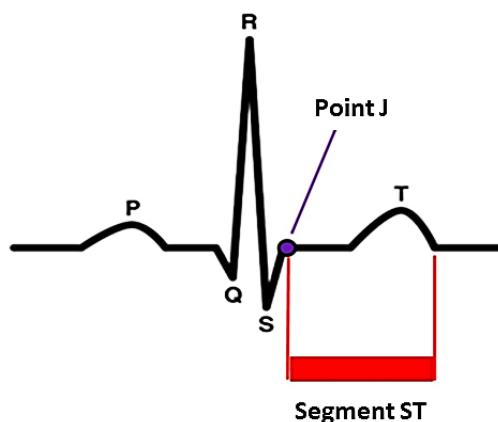


Fig.39 : Le point J.

L'onde T (Fig.40), représente la repolarisation des ventricules. Elle est normalement asymétrique avec une première pente lente, un sommet arrondi et une deuxième pente rapide. Selon la dérivation l'onde T est positive ou négative. Son amplitude varie de 1 à 7 mm en dérivation bipolaires des membres des membres, de 3 à 5mm en unipolaires et de 2 à 20 mm en dérivation précordiales. Son axe varie entre 10 et 70°. Elle est toujours positive en D1 et D2 et de V2 à V6 chez l'adulte. Elle peut persister négative en V1 chez l'adulte elle est dite onde T juvénile.



Fig.40 : L'onde T.

L'intervalle QT (Fig.41), se mesure du début du QRS à la fin de l'onde T. Il exprime le temps global des phénomènes électriques ventriculaires (dépolarisation et repolarisation). L'intervalle QT est fonction de la fréquence cardiaque; c'est pourquoi il est préférable d'utiliser le **QT corrigé** (QTc) qui se calcule avec la formule de Bazett :

$$\text{QT corrigé (sec) (QT que doit avoir le malade)} = \frac{\text{QT (sec) du malade calculé sur l'ECG}}{\sqrt{\text{RR(Sec)}}}$$

Le QT du malade est le QT que l'on calcule sur l'électrocardiogramme du malade. L'intervalle RR est la distance en secondes entre 2 sommets successifs de l'électrocardiogramme du malade lorsque le rythme est régulier.

Les valeurs normales du QT corrigé sont les suivantes :

< 440 ms chez l'homme (0,44 sec) et > 350 ms

< 460 ms chez la femme (0,46 sec) et > 350 ms

Le QT est dit raccourci lorsque sa valeur corrigée est inférieure à 350 ms (<0,35 sec).

Vous trouverez dans la littérature d'autres valeurs du QTc qui ne s'éloignent pas de ceux-là. Il s'agit d'études sur des populations différentes.



Fig.41 : L'intervalle QT.

Les anomalies de l'intervalle QT sont :

- L'allongement de l'espace QT se produit dans l'hypocalcémie, l'hypokaliémie, l'hypertrophie ventriculaire gauche sous l'action de certains anti-arythmiques, dans le bloc de branche et dans l'infarctus du myocarde.

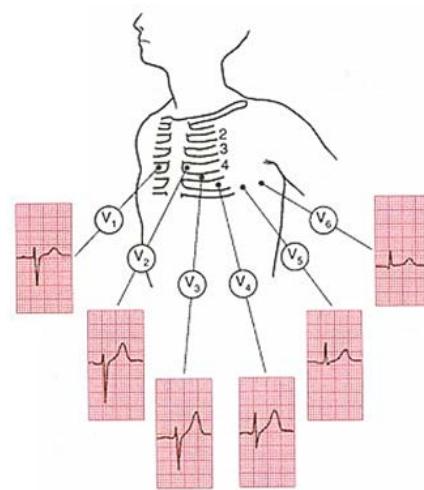
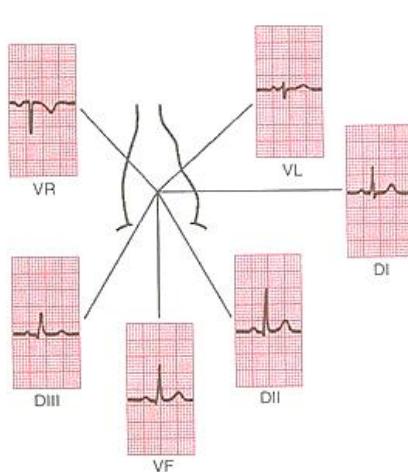
- Le raccourcissement de l'espace QT se voit dans l'hypercalcémie et sous l'action des digitaliques.

L'onde U (Fig.42) : est une onde monopolaire inconstante de faible amplitude (0,5 à 1,5 mm) Elle est inférieure à $\frac{1}{4}$ de l'amplitude de l'onde T. Elle survient après l'onde T. Tantôt elle en est séparée par un segment iso-électrique, tantôt elle est plus ou moins soudée à cette onde. Sa durée est comprise entre 0.18 et 0.20 secondes. Elle est bien visible chez les sujets jeunes, les vagotoniques, les sportifs et en cas d'hypokaliémie. L'origine de l'onde « u » est discutée en dehors des états d'hypokaliémie. Elle est physiologique chez l'enfant. Pour certains auteurs, elle est le témoin d'une repolarisation tardive de zones myocardiques d'amplitude inscrite entre celle de l'onde P et celle de l'onde T.



Fig.42 : L'onde U.

7. ENREGISTREMENT DES DERIVATIONS PRECORDIALES:



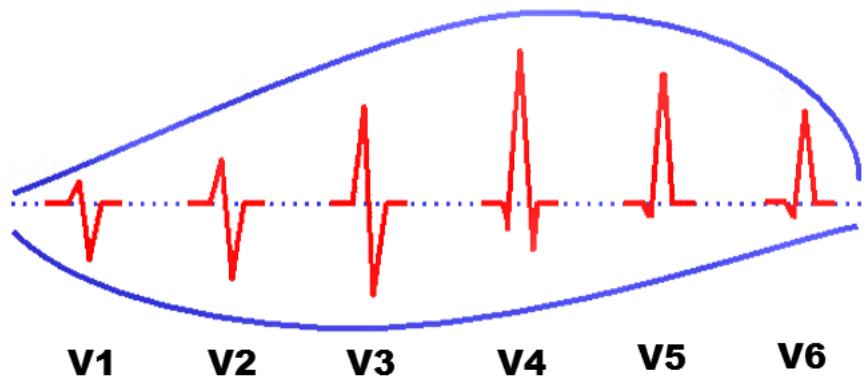


Fig.43 : Enregistrement des déflexions de l'électrocardiogramme dans les dérivations précordiales. Notez l'aspect en accordéon : augmentation de l'amplitude des déflexions positives et diminution de l'amplitude des déflexions négatives en allant vers la gauche (ventricule gauche).

8. LA MESURE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE:

La méthode des 300 :

C'est la plus rapide et la plus utilisée. De manière approximative on divise 300 par le nombre de grands carrés (5mm) séparant 2 complexes QRS (sommets de 2 ondes R successives).

Calcul simplifié de la fréquence cardiaque :

On doit se baser sur l'intervalle entre 2 ondes (ou 2 complexes) pour estimer la fréquence.

Si par exemple, l'intervalle RR correspond à un grand carré, la fréquence sera de 300/min (60 sec/min).

Si l'intervalle RR correspond à deux grands carrés, la fréquence sera de 150/min (60 sec/min) et ainsi de suite.

Carré	1	2	3	4	5	6
Fréquence	300	150	100	75	60	50

Utilisation de la méthode

- Repérer une onde R ou une onde S coïncidant avec le trait d'un carré.
- Cette onde est le point de départ pour l'estimation.
- Compter le nombre de grand(s) carré(s) qui sépare la prochaine onde R ou S (intervalle RR ou intervalle SS) du point de départ.
- Se référer à la série de chiffres pour déterminer la fréquence approximative.

Un exemple de calcul de la fréquence cardiaque (Fig.44):

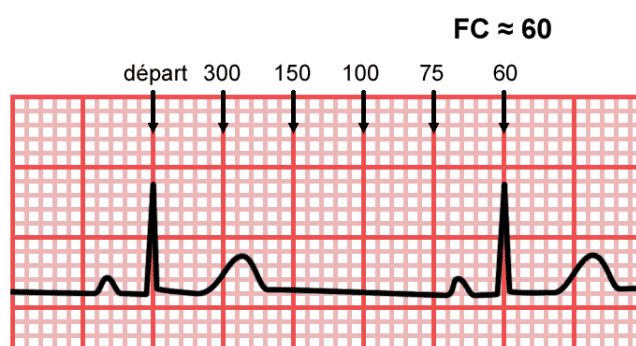


Fig.44 : Calcul de la fréquence cardiaque.

L'intervalle RR coïncide exactement avec les traits foncés de la grille. Il suffit de compter le nombre de grands carrés : il y en a 5, donc la fréquence cardiaque est de $300/5 = 60/\text{minute}$.

La fréquence normale est entre 60 et 100 battements par minute. Une fréquence inférieure à 60 battements par minute est appelée bradycardie, supérieure à 100 battements par minute est appelée tachycardie.

- Bradycardie < 60/mn.
- Tachycardie > 100/mn.
- Pause significative > 2,5 secondes.

9. L'AXE ELECTRIQUE MOYEN DU COEUR:

L'activité électrique peut être schématiquement représentée par une ligne droite dont la longueur témoigne de la force de déplacement de l'influx, une flèche indiquant la direction : c'est une représentation vectorielle.

Le septum et les ventricules ont un grand nombre de vecteurs représentant les activités septale et ventriculaire.

L'addition de tous les vecteurs du septum et des ventricules, en tenant compte respectivement de la force et de la direction, permet de schématiser un vecteur moyen appelé **axe moyen de QRS** (Fig.45).

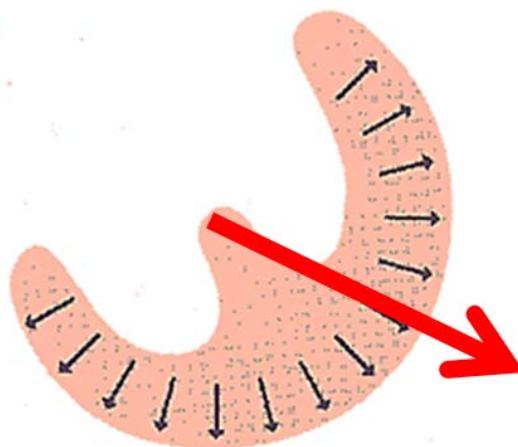


Fig.45 : Axe électrique moyen du cœur.

10. CALCUL DE L'AXE DE DEPOLARISATION VENTRICULAIRE OU AXE DE QRS :

Dans la méthode d'EINTHOVEN, on peut s'aider pour le calcul de l'axe du complexe de dépolarisation ventriculaire (complexe QRS) d'un graphique dont la construction se fait à partir du centre du triangle d'EINTHOVEN.

Le triangle étant équilatéral, on peut dessiner, à partir de son centre des parallèles aux côtés du triangle orientées de la même façon, et faisant donc entre-elles des angles égaux à ceux du triangle d'Einthoven (Fig.46).

Pour calculer l'axe de dépolarisation ventriculaire (axe QRS), il faut faire une translation au centre du triangle des dérivations standards et mesurer l'amplitude ou mieux la surface en unités Ashman d'un QRS dans deux dérivations et reporter ces valeurs sur les axes correspondants du cercle trigonométrique afin d'obtenir la résultante vectorielle.

Pour l'amplitude finale du QRS, il faut additionner la valeur positive de R aux valeurs négatives de Q et S.

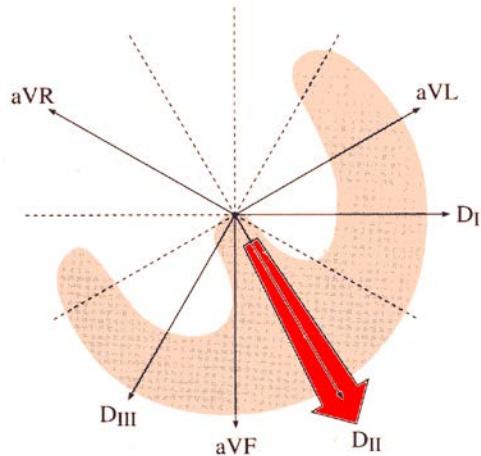


Fig.46 : Translation au centre du triangle d'Einthoven des dérivations standards
Axe moyen normal du cœur selon le plan frontal de QRS (AQRS).

Grace à ce point origine commun, ce système, triaxial de droites facilite la construction des vecteurs. On peut le compléter en ajoutant sur la figure à partir du même point d'origine, les axes de dérivation de VR, VL et VF. Le plan frontal est ainsi divisé en 12 angles de 30° .

La construction géométrique du vecteur moyen de QRS (AQRS) se fait en mesurant les surfaces du QRS en unités Ashman.

L'unité Ashman correspond à la surface de 1mm^2 résultant de la multiplication d'une unité en abscisse représentant le temps : $1\text{mm} = 0.04 \text{ sec}$ et d'une unité en amplitude : $1 \text{ mm} = 0.1 \text{ mvolt}$, cette unité s'exprime alors en mm/sec . On convient de ne considérer que les surfaces au dessus et dessous du bord correspondant à la ligne iso- électrique.

Les mesures seront portées sur les axes des dérivations D1, D2 et D3 en respectant le sens(+) ou (-) de la surface calculée.

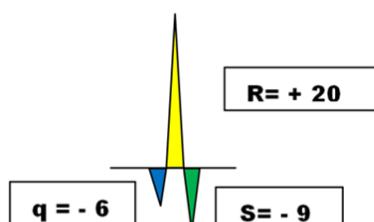
Il est possible de construire de la même manière les vecteurs moyens pour les ondes P et T de l'électrocardiogramme.

Exercice pratique :

On choisit 2 dérivations périphériques, de préférence des dérivations standards : ici nous avons choisi D1 et D3

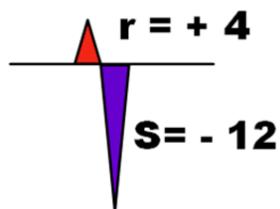
1ère étape (Fig.47) : il faut calculer la surface des déflexions en mm^2 ou en unités Ashman (1 unité Ashman = 1mm^2) des 2 dérivations D1 et D3. Tout ce qui est au-dessus de la ligne iso-électrique est positif, tout ce qui est en dessous de la ligne iso-électrique est négatif. On fait alors la somme pour chaque dérivation. On peut, pour aller plus vite, remplacer les surfaces par les amplitudes des déflexions.

Dérivation D I



$$\text{Total: } +20 - 6 - 9 = +5$$

Dérivation D III



$$\text{Total: } +4 - 12 = +8$$

Fig.47 : Présentation des 2 dérivation choisies (D1 et D3) d'un tracé électrocardiographique.

2ème étape (Fig.48) :

Il faut reporter sur un papier millimétré la valeur de la somme de chaque dérivation sur l'axe de la dérivation. Attention, si cette valeur est négative, il faut la reporter sur le côté négatif de la dérivation, si elle est positive, il faut la reporter sur le côté positif. Ici, les 2 totaux sont positifs, donc on reportera les 2 valeurs positives sur le côté positif des 2 dérivation.

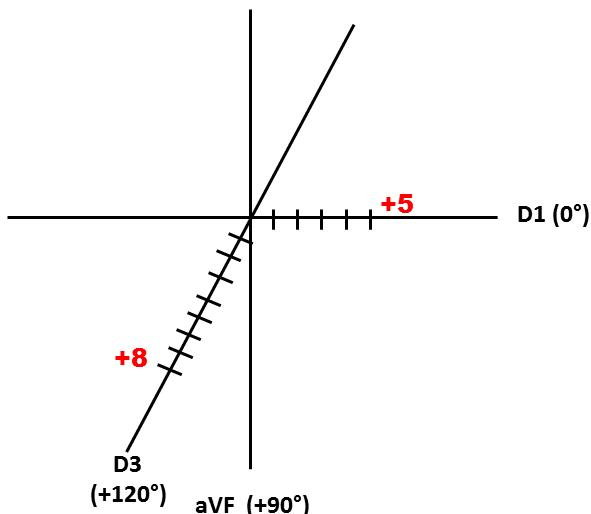


Fig.48 : Voici comment reporter les valeurs de chaque dérivation sur les axes de ces dérivation.

3ème étape (Fig.49) :

Il faut ensuite tracer les parallèles aux 2 axes des dérivation pour ensuite avoir la résultante vectorielle.

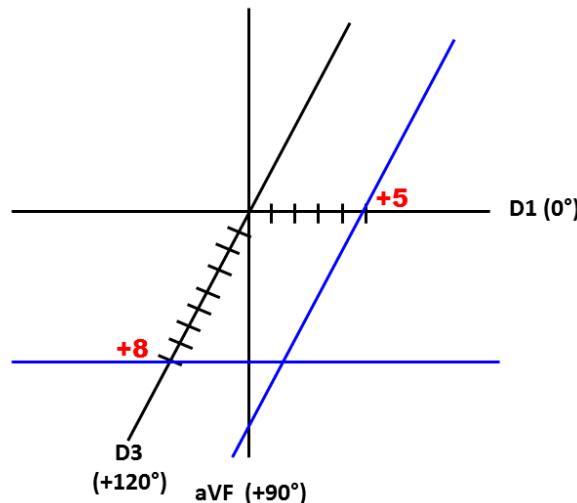


Fig.49 : Voici comment on trace les parallèles aux dérivations choisies en fonction de leurs valeurs.

3ème étape (Fig.50) :

On trace la résultante qui nous donnera exactement l'axe de QRS qui sera l'angle calculé par rapport à l'horizontal.

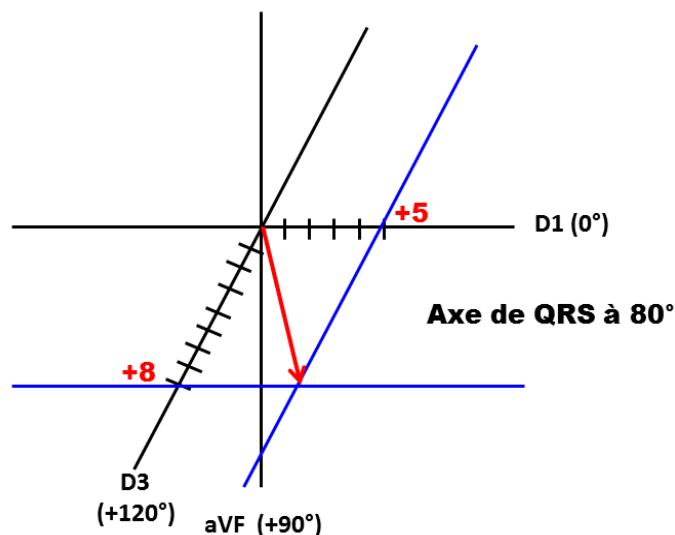


Fig. 50 : Voici comment on trace la résultante qui sera la direction de l'axe de QRS qui ici est à 80° de l'horizontale.

Détermination approximative de l'axe de QRS par le calcul des amplitudes au lieu des surfaces:

Cette méthode est moins précise que celle du calcul des surfaces mais elle est valable. Elle consiste à calculer l'amplitude des déflexions au lieu de leurs surfaces. Une détermination peut se faire aussi en choisissant 2 dérivations perpendiculaires, l'une en axe horizontal (D1) et l'autre en axe vertical (aVF). Le vecteur moyen de QRS sera alors la diagonale résultante du vecteur de D1 et du vecteur d'aVF (Fig. 51).



R= + 23mm

S= - 14 mm

D1



R= + 13mm

q= - 3mm + s= - 4mm= - 7mm

aVF

$$\mathbf{D1= +23mm - 14mm= +9mm}$$

$$\mathbf{aVF= +13mm - 3mm= +10mm}$$

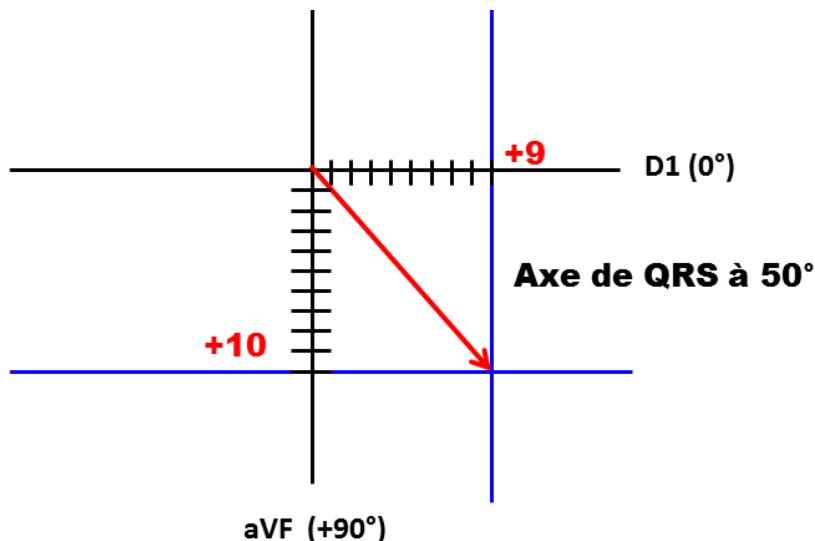


Fig.51 : Exercice pratique du calcul de l'axe de QRS en utilisant les amplitudes.

- Choisir 2 dérivations perpendiculaires, ici D1 (plan horizontal) et aVF (plan vertical).
- Reporter la valeur de D1 sur l'axe de D1 (horizontal) = $D1= R+23mm - S-14mm= +9mm$
- Reporter la valeur d'aVF sur l'axe d'aVF (vertical) = $aVF= +13mm - 3mm= +10mm$
- Tracer la résultante vectorielle= c'est l'axe de QRS, ici à $+50^\circ$.

Valeurs normales de l'axe de QRS (Fig. 52) :

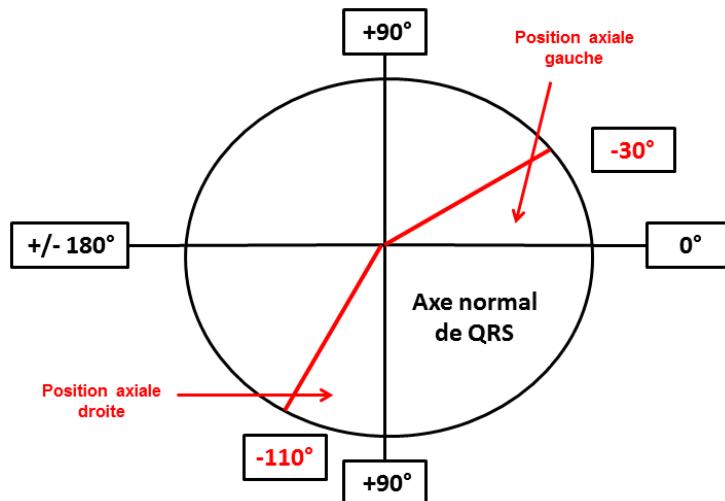


Fig.52 : Valeurs et positions axiales normales de l'axe de QRS.

L'axe normal de QRS est situé entre 0° et +90°.

Entre 0° et -30°, il s'agit d'une position axiale gauche.

Entre +90° et 110°, il s'agit d'une position axiale droite.

Au-delà de -30°, il s'agit d'une déviation axiale gauche.

Au-delà de 110°, il s'agit d'une déviation axiale droite.

Quand l'axe est dans la zone normale c'est-à-dire entre 0° et + 90°:

- si DIII est isoélectrique, l'axe est à +30°
- si aVL est isoélectrique, l'axe est à +60°
- si aVF est isoélectrique, l'axe est à 0°
- si DI est isoélectrique, l'axe est à +90°

Quand il y a une déviation axiale droite :

- Si DI est isoélectrique, l'axe est à +ou -90°
- Si aVR est isoélectrique, l'axe est à +120°
- Si DII est isoélectrique, l'axe est à +150°
- Si aVF est isoélectrique, l'axe est à + ou -180°
- Si aVL est isoélectrique, l'axe est à -120°
- Si DIII est isoélectrique, l'axe est à -150°.

Quand il y a une déviation axiale gauche :

- Si aVF est isoélectrique, l'axe est à 0°
- Si DII est isoélectrique, l'axe est à -30°
- Si aVR est isoélectrique, l'axe est à -60°
- Si DI est isoélectrique, l'axe est à -90°.

11. LES INDICES :

Certains indices doivent être calculés obligatoirement et sont utiles au diagnostic des hypertrophies myocardiques.

Dans les dérivations précordiales, on utilise les critères suivants :

- **Indice de Sokolov-Lyon :** S en V1 + R en V5 (normale < 35 mm sauf chez le sujet jeune) au-delà le tracé est compatible avec une hypertrophie ventriculaire gauche.
- **Indice de Blondeau-Heller :** S en V2 + R en V7.

Une valeur supérieure à 35 mm chez l'adulte et de 45 mm chez le sujet de moins de 20 ans est pathologique et traduit une hypertrophie ventriculaire gauche.
Il est considéré par beaucoup comme plus sensible que le classique indice de Sokolow-Lyon.

Dans les dérivations périphériques on utilise les critères suivants :

- **Indice de Lewis:** (amplitude de R en DI - amplitude de R en DIII) + (amplitude de S en DIII – amplitude de S en D1).
(Normale comprise entre – 14mm et + 17mm). Les valeurs < -14mm traduisent une hypertrophie ventriculaire droite et supérieures à +17mm une hypertrophie ventriculaire gauche.
- **Indice de White et Bock :** fondé sur la somme de la positivité la plus grande en D1 et de la négativité la plus grande en D3 dont on retranche la somme de la négativité la plus grande en D1 et de la positivité la plus grande en D3.
Il est normalement compris entre – 14mm et + 17 mm.
Cette formule est plus intéressante que celle de Lewis quand l'onde Q est plus ample que l'onde S en D1 et D3
- **Indice de Cornell :** SV3 + RaVL. (valeurs normales: < 20 chez la femme et < 28 chez l'homme).
- **Rapport R/S <1 :** en V1 et >2 en V6.

- **Délai d'apparition de la déflexion intrinsécoïde**

Ce délai d'apparition représente le temps que met l'onde de dépolarisation à parcourir le myocarde, depuis l'endocarde jusqu'à l'épicarde; il est d'autant plus long que le myocarde est plus épais. Cette déflexion intrinsécoïde se mesure sur les dérivations précordiales en regard des ventricules : précordiales droites V3R - V1 - V2 pour le calcul de la déflexion intrinsécoïde du ventricule droit ; précordiales gauches V5 - V6 - V7 pour le calcul de la déflexion intrinsécoïde du ventricule gauche. La mesure de la déflexion intrinsécoïde se fait du début de QRS (pied de l'onde q ou pied de l'onde R en l'absence d'onde q) jusqu'au sommet de l'onde R. Il est inférieur ou égal à 0,03 seconde dans les dérivations explorant le ventricule droit (en particulier V1), et à 0,04 seconde dans les dérivations explorant le ventricule gauche (en particulier V6). Cette différence entre les ventricules droit et gauche s'explique par la différence d'épaisseur de leur paroi musculaire, respectivement 2,5 et 12 mm L'axe électrique : il est la résultante des différents vecteurs électriques correspondant à l'excitation de chaque fibre. Il s'exprime par la mesure en degrés de l'angle que fait ce vecteur avec l'axe horizontal.

12. L'ELECTROCARDIOGRAMME NORMAL DE L'ENFANT:

Les électrodes utilisées doivent être plus petites.

La fréquence cardiaque s'accélère régulièrement de la fin de la première semaine au 3ème mois, pour décroître ensuite régulièrement jusqu'à l'âge de 15 ans. Après 3 ans le rythme est toujours inférieur à 100 par minute.

L'onde P : sa durée augmente progressivement de la naissance à 16 ans.

L'amplitude de l'onde P est faible en général ne dépassant pas un mm avec un aspect diphasique fréquent en V1 et V2.

L'espace PR est souvent inférieur à 0.12 seconde avant 3 ans et quelquefois jusqu'à 15 ans

L'intervalle PR sera allongé au-delà de :

- 0,14 sec jusqu'à 1 ans.
- 0,16 sec de 1 à 5 ans.
- 0,18 sec de 5 à 15 ans.

Le complexe QRS : son étude chez l'enfant est d'une grande importance. Sa durée augmente progressivement avec l'âge sans jamais dépasser 0,10 sec à 5 ans.

L'axe AQRS : déviation axiale droite jusqu'à 3 mois (+120° ou plus) après l'AQRS se stabilise entre 0° et 100° avec une moyenne à 60°.

En dérivations précordiales, la hauteur de l'onde S se modifie schématiquement ainsi : plus grande en V1 qu'en V6 de la naissance à 6 mois, elle est égale dans les 2 dérivations de 6 mois à 1 ans.

En pratique une onde R exclusive en V1 et une onde R supérieure à 9mm après 5 ans sont tenues pour pathologiques.

L'onde T : toujours positive en D1 et D2, positive ou négative en D3 toujours négative en aVR. Une onde T négative en D1 et D2 est toujours anormale. En précordiales : à la naissance l'onde T est positive en V1 et V2, négative en V5 et V6. Après 24 heures de vie l'onde T est toujours négative en V1 et positive en V5 et V6. L'amplitude de l'onde T varie avec la respiration.

13. L'ELECTROCARDIOGRAMME NORMAL DU SUJET AGE:

L'âge moyen de QRS est compris entre +30 et 60°. Il y a une diminution importante de l'amplitude des ondes r en V1, V2 et V3 et une augmentation des ondes R en V5, V6. L'axe électrique de l'onde T est vertical. L'onde T est fréquemment plate en V5 et V6. Des troubles de la conduction peuvent se voir.

14. INTERPRETATION DE L'ELECTROCARDIOGRAMME: (8), (9), (10).

Elle ne peut être valide que si l'appareil est correctement étalonné et les électrodes correctement positionnées.

Les renseignements suivants sont utiles à avoir pour l'interprétation :

- Nom, prénom, date de naissance (étiquette).
- Date et heure de l'enregistrement.
- Numéro de l'électrocardiogramme.
- Diagnostic clinique.
- Médicaments en cours ou administrés avant.
- Douleurs thoraciques existantes ou non.
- Pacemaker implanté oui ou non.

Dans les pathologies cardiaques, où plusieurs électrocardiogrammes sont nécessaires, marquer les différents emplacements des électrodes sur la peau au stylo.

Un électrocardiogramme normal n'élimine en aucun cas une pathologie cardiaque. Un électrocardiogramme anormal peut être également tout à fait anodin.

Etude analytique :

On commence toujours par rechercher si l'activité cardiaque de notre patient est dirigée par le nœud sinusal, c'est-à-dire **est-ce que le rythme est sinusal** ?

Le rythme est-il sinusal ?

Un **rythme cardiaque** normal est un rythme dit « sinusal » : l'activité cardiaque est normalement sous **contrôle du nœud sinusal** se caractérise par 3 critères :

- **1^{er} critère** : l'onde P positive en D1 et en D2.
- **2^{ème} critère** : onde P toujours avant QRS.
- **3^{ème} critère** : intervalle PR doit être constant, c'est-à-dire ayant la même valeur sur tout le tracé électrocardiographique (pas de variabilité de la durée de l'intervalle PR).

Le rythme est-il régulier ?

La régularité d'un rythme se voit l'équidistance entre les sommets des ondes R. Si l'équidistance existe, le rythme est dit régulier.

Quelle est la fréquence cardiaque ?

Comme nous l'avons vu dans le chapitre « calcul de la fréquence cardiaque », la fréquence cardiaque se calcule soit avec une calculette, soit en divisant le chiffre 300 par le nombre de grands carreaux de 5 mm de côté séparant 2 sommets d'ondes R successifs. Par exemple si le nombre de grands carreaux est de 5, la fréquence cardiaque sera de 60 par minute. La mémorisation de la séquence « 300, 150, 100, 75, 60, 50 » permet ainsi une estimation rapide de la fréquence, par exemple s'il y a 2 carrés entre 2 QRS la fréquence est de 150 battements par minute, s'il y a 4 carrés elle est de 75, s'il y a 6 carrés elle est de 50. En cas d'arythmie, il est nécessaire de faire la moyenne de 3 ou de 5 cycles successifs.

On analyse ensuite la durée, l'amplitude et l'axe de l'onde P.

On mesure la durée des intervalles PR et PQ.

On analyse ensuite la durée, l'amplitude et l'axe du complexe QRS.

On analyse ensuite la durée, l'amplitude et l'axe de l'onde T.

On étudie ensuite le point J (sus ou sous-décalé par rapport à la ligne iso-électrique).

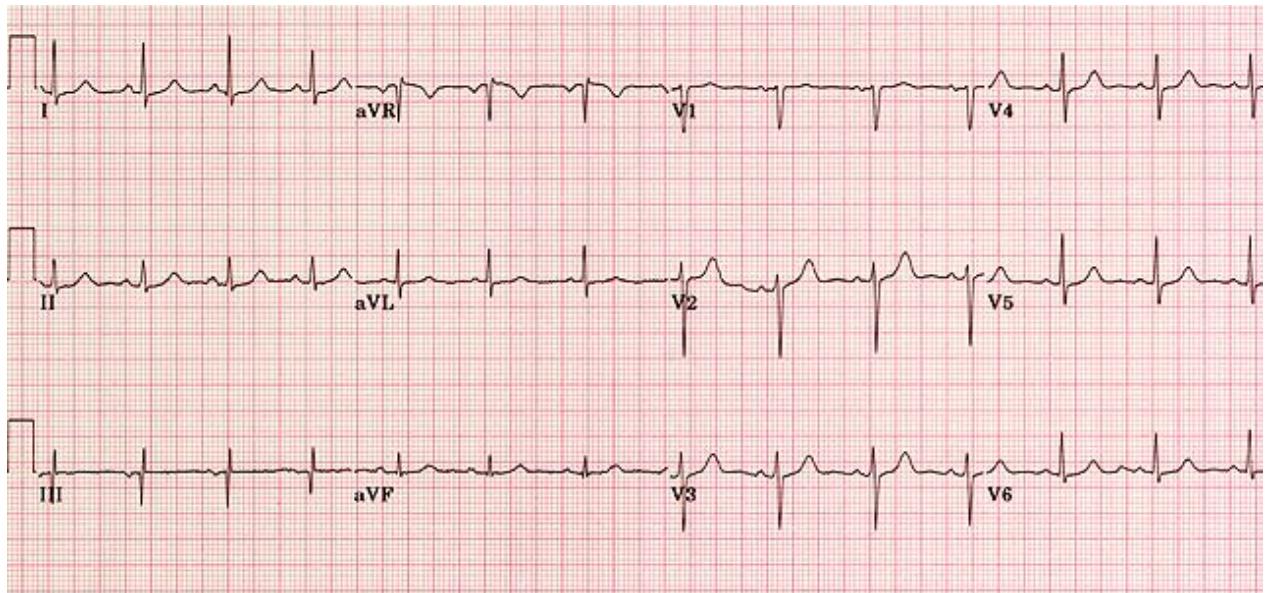
On étudie ensuite la repolarisation ventriculaire : étude du **segment ST** en vérifiant s'il se situe sur la ligne isoélectrique ou s'il présente un décalage (sous ou sus décalage).

On étudie ensuite l'intervalle QT en calculant le QT corrigé.

Enfin on étudie les indices : Sokoloff-Lyon, Lewis, White et Bock, Cornell et Blondeau-Heller.

Etude synthétique :

On terminera par l'étude synthétique qui consistera à rassembler toutes les anomalies rencontrées et à établir une **conclusion de l'interprétation de l'électrocardiogramme**.



Tracé électrocardiographique d'un sujet normal âgé de 45 ans.

15. BIBLIOGRAPHIE

- 1- Rubart M, Zipes DP. Genesis of cardiac arrhythmias: electrophysiological considerations. In: Zipes DP, Libby P, Bonow RO, Braunwald E. Braunwald's heart disease. A textbook of cardiovascular medicine. Philadelphia:Elsevier Saunders, 2005, 653-95.
- 2- Die Topographie und Histologie der Brückenfasern. Ein Beitrag zur Lehre von der Bedeutung der Purkinjeschen Fäden. (Vorläufige Mitteilung). Zentralblatt für Physiologie, Band 19, Nr. 3, 6. Mai 1905, S. 70-77
- 3- Einthoven W: Nieuwe methoden voor clinisch onderzoek [New methods for clinical investigation]. Ned T Geneesk 29 II: 263-286, 1893.
- 4- Einthoven W. Ueber die Form des menschlichen Electrocardiogramms. Arch f d Ges Physiol 1895;60:101-123
- 5- Schamroth L. - The S1 S2 S3 syndrome, in : The 12-lead Electrocardiogram Book 1, Blackwell scientific publications, 2nd edition, pp78-79, 1990.
- 6-Barnes AR, Pardee HEB, White PD. et al. Standardization of precordial leads. Am Heart J 1938;15:235-239
- 7- Chou T-C. 1. Normal Electrocardiogram, in : Electrocardiology in Clinical Practice, Grune & Stratton, New-York, San Francisco, London, pp. 3-26, 1979.
- 8- Jean Sende, *Guide pratique de l'ECG*, Estem, 2003, 216 p. (ISBN [2843712106](#), lire en ligne [archive])
- 9- Andrew-R Houghton, David Gray, *Maîtriser l'ECG : de la théorie à la clinique*, Elsevier Masson, 2005, 274 p. (ISBN [2294014669](#), lire en ligne [archive])

10- Kligfield et al. Recommendations for standardization and interpretation of the electrocardiogram. Part I. Circulation 2007; 115: 1306 - 24.